



**Emplazamiento Sustentable de Sistemas de Microgeneración
Eólica en Colombia desde la Perspectiva del Desarrollo
Sustentable**

Jhonatan Ospina Molina

Universidad ECCI
Maestría en Ingeniería con énfasis en Mecánica
Bogotá, Colombia
2020

Emplazamiento Sustentable de Sistemas de Microgeneración Eólica en Colombia desde la Perspectiva del Desarrollo Sustentable

Jhonatan Ospina Molina

Tesis de grado presentado como requisito para optar al título de:
Magíster en Ingeniería

Director:
Ph.D. Juan Sebastián Solís-Chaves

Línea de Investigación:
Energía y Transporte
Grupo de Investigación:
Grupo de Investigación en el Aprovechamiento Tecnológico de los Materiales y la Energía
«GIATME»

Universidad ECCI.
Maestría en Ingeniería
Bogotá DC, Colombia
2020

Dedicatoria

Doy gracias a Dios por todas las bendiciones recibidas hasta hoy, por su guía a lo largo de mi existencia en diferentes momentos de dificultad y debilidad. De igual manera a mi madre, quien siempre ha estado conmigo bajo cualquier circunstancia de la vida; brindándome el apoyo necesario. A mi familia, amigos y personas que contribuyeron para alcanzar este nuevo logro, que me hace crecer como profesional y como persona.

Algunas personas quieren que algo ocurra, otras sueñan con que pasará, otras hacen que suceda.

MICHAEL JORDAN

Agradecimientos

Doy gracias a mi director de tesis, Dr. Juan Sebastián Solís-Chaves, por su guía y colaboración incondicional en el proceso de aprendizaje y de creación del documento tesis; a mi colega Ing. Andres Felipe Medina Gamba, por su apoyo y colaboración en los diferentes procesos académicos y personales.

Resumen

Este documento está elaborado desde la perspectiva de la necesidad de contar en el país con un proyecto que revisara la metodología del emplazamiento óptimo de la microgeneración eólica en Colombia, basándose no sólo en el desarrollo económico, sino considerando la Sustentabilidad. Para ello fue importante considerar diferentes investigaciones hechas en países vecinos y que tienen como objetivo aprovechar la energía renovable desde un panorama de la Sustentabilidad de la producción energética.

Por esta razón, este trabajo de investigación está alineado bajo los pilares de la Sustentabilidad Fuerte, basándose para ello en los tres ejes o esferas: El Ambiental, el Económico y el Social. Estos ejes fueron decisivos para determinar la importancia relativa de cada uno de los factores considerados en el método multicriterio desarrollado.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, el proyecto recolecta información geográfica (también llamados Planos de Información) para la creación de tres escenarios de estudio cubriendo los ejes de la sustentabilidad, con base en los siguientes factores de decisión: El Nivel de Desarrollo municipal, las Zonas no interconectadas, el Nivel Energético Municipal, los Parques Naturales Nacionales, velocidad promedio del viento a 50 m de altura y la división política de Colombia a nivel municipal. Teniendo como referente el valor contemplado en Colombia como microgeneración de energía que hace referencia a máximo de 20MW.

El primer Escenario usa como insumo para la determinación de los pesos relativos de los planos de información, una serie de encuestas realizadas a la comunidad Universitaria de la ECCI. El segundo Escenario de desarrollo sustentable que se enfoca en el aprovechamiento del recurso eólico de una manera responsable cuidando del medio ambiente y priorizando el ejem social. El tercer escenario de liberalismo económico prioriza el interés económico restándole importancia al impacto ambiental o el beneficio social que un sistema de generación renovable traería al as Comunidades de regiones apartadas, como lo son las que pertenecen a las ZNI.

Después de tener toda esta información compilada, se aplicó el método ó modelo estadístico de jerarquización analítica (AHP) y el método ó modelo estadístico de combinación lineal ponderada (WLC); usando para su implementación y análisis el software libre QGIS. El resultado final de estas metodologías son tres mapas de emplazamiento para proyectos de microgeneración eólica, mapas que señalan los municipios más idóneos para la aplicación de proyectos de aprovechamiento de energía eólica, para los tres escenarios considerados.

Palabras clave: Zona no interconectada, energía eólica, sustentabilidad, ambiental, económico, social, Sistemas de Información Geográfica (SIG), emplazamiento, escenario, energía renovable.

Abstract

This document is prepared from the perspective of the needs of our country. Since there was no project of these characteristics; which would give a scope of review of the location of the wind microgeneration in Colombia. For this, it was important to take into account the different investigations carried out in countries that aim to take advantage of renewable energy from a perspective of the sustainability of energy production.

For this reason, this research work is aligned under the pillars of Strong Sustainability, basing it on the three axes or spheres: Environmental, Economic and Social. These axes were decisive in determining the relative importance of each of the factors considered in the multi-criteria method developed.

Taking into account the aforementioned, the project collects geographic information (also called Information Plans) for the creation of three study scenarios covering the axes of sustainability, based on the following decision factors: The Municipal Development Level, the Non-interconnected areas, the Municipal Energy Level, the National Natural Parks, average wind speed at 50 m high and the political division of Colombia at the municipal level.

The first Scenario uses as input for the determination of the relative weights of the information planes, a series of surveys carried out to the University community of the ECCI. The second Scenario of sustainable development that focuses on the use of the wind resource in a responsible way taking care of the environment and 3 Scenario of economic liberalism prioritizing the economic interest without giving so much importance to pollution or the damage that may occur in the process .

Where each one of them exploits from the point of view of the population, the privilege of harnessing energy generating the least possible negative impact and having the project economy as the main objective respectively.

After having all this information compiled, the analytical ranking statistical method or model (AHP) and the weighted linear combination method or statistical model (WLC) were applied; using the free software QGIS for its implementation and analysis. The final result of these methodologies are three location maps for wind microgeneration projects, maps that indicate the most suitable municipalities for the application of wind energy utilization projects, for the three selected scenarios.

Keywords: Non-interconnected zone, wind energy, sustainability, environmental, economic, social, QGIS, site, scenario, renewable energy.

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Lista de símbolos	XVII
1. Introducción	1
1.1. Los Objetivos del Desarrollo Sustentable y la Microgeneración Eólica	1
1.2. Objetivos de la investigación	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Tipo de investigación.	3
2. Caracterización y aprovechamiento del recurso eólico en Colombia.	4
2.1. El recurso renovable y la energía alternativa.	5
2.1.1. Recursos renovables y no renovables.	5
2.1.2. Energía alternativa.	6
2.1.3. Energía Solar.	6
2.1.4. Energía hidroeléctrica.	6
2.1.5. Energía geotérmica.	6
2.1.6. Energía maremotriz y undimotriz.	7
2.1.7. Energía de la biomasa.	7
2.1.8. Energía proveniente del biogás.	7
2.1.9. Energía eólica.	7
2.1.10. ¿Qué es el viento?	8
2.1.11. ¿Qué es la velocidad del viento?	9
2.1.12. Velocidad promedio del viento.	9
2.1.13. Recurso eólico en Colombia.	10
2.1.14. Distribuciones estadísticas para modelar la velocidad del viento. . . .	10
2.1.15. La distribución de Rayleigh.	10
2.1.16. La distribución Lognormal	11
2.1.17. La distribución Gamma	11
2.1.18. La distribución de Weibull	11
2.1.19. Atlas colombiano de velocidad del viento a 50m de altura.	12

2.1.20.	Rosa de viento.	15
2.1.21.	Altura de las corrientes de viento.	16
2.2.	Sistemas de Generación de Energía Eólica	17
2.2.1.	Resumen Histórico de la Evolución de los Aerogeneradores	17
2.2.2.	Partes básicas ó componentes de una turbina eólica	19
2.3.	Clasificación de los aerogeneradores.	21
2.3.1.	Según el número de palas.	21
2.3.2.	Según la posición del rotor.	22
2.3.3.	Según el anclaje de sus hélices al buje.	22
2.3.4.	Según el tamaño y potencia.	22
2.3.5.	Según la disposición del eje de trabajo.	22
2.4.	Tipologías más comunes del conjunto aerogenerador-convertidor de potencia.	29
2.4.1.	Generador Síncrono de Imán Permanente.	29
2.4.2.	Generador de Inducción Jaula de Ardilla.	31
2.4.3.	Generador de Inducción Doblemente Alimentado.	32
2.5.	Potencias de generación.	33
2.5.1.	Aerodinámica:	33
2.5.2.	Viscosidad:	33
2.5.3.	Flujo laminar:	34
2.5.4.	Energía:	34
2.5.5.	Eficiencia de la energía eólica:	34
2.5.6.	Potencia de turbina eólica	36
2.6.	Otros componentes.	37
2.6.1.	Batería de plomo ácido.	37
2.6.2.	Batería de Níquel-Cadmio.	38
2.6.3.	Batería de sulfuro de sodio.	38
2.6.4.	Batería de Litio.	38
2.6.5.	Elementos de transporte de energía eléctrica.	39
2.7.	Fondos de financiación de proyectos.	39
2.7.1.	FAZNI: Fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas no interconectadas.	40
2.7.2.	SGR: Sistema General de Regalías.	40
2.7.3.	FAER: Fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas rurales interconectadas.	41
2.7.4.	FINDETER.	42
2.7.5.	BANCOLDEX.	42
2.7.6.	MinCiencias.	42
2.7.7.	Banco interamericano de desarrollo.	42
2.7.8.	Banco Mundial.	43
2.7.9.	CAF: Banco de Desarrollo de América latina.	43

2.7.10. FENOGE: Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía.	43
2.7.11. PRONE: Programa de Normalización de Redes Eléctricas.	44
2.7.12. FOES: Fondo de Energía Social.	44
2.7.13. FSSRI: Fondo de Solidaridad para Subsidios y redistribución del ingreso.	46
2.7.14. FNR: Fondo Nacional de Regalías	47
2.8. La sustentabilidad.	47
2.8.1. Definición	47
2.8.2. Eje ambiental.	48
2.8.3. Eje social.	49
2.8.4. Eje económico.	50
3. Metodología para la Aplicación del Método Multicriterio	51
3.1. Revisión de la disponibilidad del recurso eólico	51
3.2. Planos de información.	51
3.2.1. Mapa de velocidad del viento a 50m periodo 2000-2010.	52
3.2.2. Mapa de cobertura de energía 2012.	54
3.2.3. Mapa de zonas no interconectadas 2015.	56
3.2.4. Mapa de desarrollo humano municipal.	58
3.2.5. Mapa de parques naturales nacionales.	60
3.2.6. Mapa de la división política municipal.	62
3.3. Escenarios planteados.	63
3.3.1. Escenario de encuestas realizadas a la Comunidad ECCI	63
3.3.2. Escenario de Desarrollo Sustentable	64
3.3.3. Escenario de liberalismo Económico	64
3.4. Métodos de estadística multivariada.	65
3.5. Aplicación de la Combinación Lineal Ponderada WLC.	72
4. Análisis de resultados.	73
4.1. Resultado de encuestas realizadas.	73
4.2. Tablas y mapas de resultados aplicación WLC.	76
4.2.1. Tabla, mapa y análisis de resultados WLC escenario de encuestas.	77
4.2.2. Tabla, mapa y análisis de resultados WLC escenario de desarrollo sustentable.	79
4.2.3. Tabla, mapa y análisis de resultados WLC escenario de liberalismo económico.	82
5. Conclusiones y recomendaciones.	84
5.1. Conclusiones	84
5.2. Recomendaciones	85

A. Anexo: Tutorial del manejo de QGIS para el tratamiento estadístico de información geográfica.	86
A.1. Resultado de las metodologías adoptadas.	86
B. Anexo: Aplicación de encuestas.	92
B.1. Creación del Cuestionario.	92
B.2. Formulación de las Preguntas.	93
B.3. Tabla de valoración de preguntas de la encuesta.	94
B.4. Resultados Tabulares del Análisis de las Respuestas al Proceso de Encuestas.	94
Bibliografía	97

Lista de símbolos

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m^2	$\int \int dx dy$
D	Diámetro	m	
t	Viscosidad	Pa*s	
E	Energía	J	
Pe	Potencia eólica	W	
HL	Flujo laminar	ft*s	
m	Masa	kg	DF
\dot{m}	Flujo de masa	$\frac{kg}{s}$	$\frac{m}{t}$
n	Velocidad de rotación	$\frac{1}{s}$	$\frac{\omega}{2\pi}$
n	Cantidad de materia	mol	DF
P	Presión	Pa	$\frac{\vec{F} \cdot \vec{n}}{A}$
Q	Calor	kJ	1. LT
T	Temperatura	K	DF
t	Tiempo	s	DF
V	Volumen	m^3	$\int dr^3$
\vec{u}	Velocidad	$\frac{m}{s}$	$(\frac{dr}{dt}, r \frac{dv}{dt}, \frac{dz}{dt})$

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
Φ_V	Flujo volumétrico	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$
ω	Velocidad angular	$\frac{1}{\text{s}}$	$\frac{dv}{dt}$

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ZNI	Zona No Interconectada.
DAS	Desarrollo municipal.
ENE	Porcentaje de nivel energetico municipal.
PNN	Parques Naturales Nacionales.
VEL	Velocidad del viento.
UPME	Unidad de planeación minero energética.
WLC	Weighted Linear Combination; Modelo estadístico de combinación lineal ponderada.
AHP	Hierarchical analytical process; Modelo estadístico de jerarquización analítica.
FAZNI	Fondo de apoyo financiero para la energizaci on de las zonas nointerconectadas.
SGR	Sistema General de Regalías.
FAER	ondo de apoyo financiero para la energizaci on de las zonas rurales interconectadas.
CAF	Banco de desarrollo de América latina.
FENOGE	Fondo de Energías No Convencionales y gestión Eficiente de la Energía.
PRONE	Programa de Normalización de Redes Eléctricas.
FOES	Fondo de Energía Social.
FSSRI	Fondo de solidaridad para subsidios y retribución de ingreso.
FNR	Fondo nacional de regalías.
DANE	Departamento administrativo nacional de estadística.
IPSE	Instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas para ZNI.
IDEAM	Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales.
DNP	Departamento nacional de planeación.
STN	Sistema de transmisión nacional.

Abreviatura Término

SINAP	Sistema nacional de áreas protegidas.
-------	---------------------------------------

1. Introducción

1.1. Los Objetivos del Desarrollo Sustentable y la Microgeneración Eólica

Uno de los proyectos o metas del ser humano al 2030 es mejorar su calidad de vida sin perder lo que ha logrado hasta el momento; por esta razón nacen los objetivos de desarrollo sostenible ó también conocidos como los objetivos mundiales; ya que estos objetivos los buscan todas las naciones para cuidar y preservar la vida del planeta y de nosotros mismos.

Los objetivos de desarrollo sostenible son 17: 1 dar fin a la pobreza, 2 Hambre cero, 3 salud y bienestar, 4 educación de calidad, 5 igualdad de género, 6 agua limpia y saneamiento, **7 Energía Asequible y No Contaminante**, 8 trabajo decente y crecimiento económico, 9 industria innovación e infraestructura, 10 reducción de las desigualdades, 11 ciudades y comunidades sostenibles, 12 producción y consumo responsable, 13 acción por el clima, 14 vida submarina, 15 vida de ecosistemas terrestres, 16 paz, justicia e instituciones sólidas y 17 alianza para lograr los objetivos [1].

Como se puede evidenciar los objetivos planteados son estratégicos, ya que todos van encaminados a mejorar nuestra calidad de vida, pero cuidando del planeta con sus diferentes recursos; ya que la diversidad de recursos nos mantiene con vida y no podemos dejar que se acaben por el beneficio de unos pocos. Por el contrario, es responsabilidad de todos los seres humanos cuidar de ellos que son la fuente de nuestra vida.

De allí radica la importancia del proyecto de investigación planteado; ya que aporta al objetivo de desarrollo sostenible número 7 y también impacta de manera positiva al objetivo número 13. Teniendo en cuenta que la investigación del emplazamiento del recurso eólico busca aprovechar la energía cinética del viento por medio de aerogeneradores convirtiéndola en energía eléctrica, la cual es utilizada por la humanidad y producida de una manera limpia comparada con la producción de energía tradicional [1].

Adicional a ello este emplazamiento de la producción de energía eléctrica por medio del aprovechamiento del recurso eólico impacta sobre factores relevantes para la sociedad, como es la implementación no sólo teniendo en cuenta la cantidad de recurso eólico sino también el impacto social positivo a las comunidades que se beneficiarían en el momento de entrar

en funcionamiento un parque eólico en estas zonas sin llegar a afectar áreas reservadas como son los parques naturales y poder suministrar energía eléctrica de forma ininterrumpida y con los índices de calidad requeridos, por medio de los recursos proporcionados por la nación a cada municipio y la inversión de fondos públicos y privados, como los que se detallan en esta tesis.

Por lo anteriormente mencionado es importante mostrar en este capítulo la estructura y origen de la investigación realizada. Para ello es necesario revisar la siguiente información:

1.2. Objetivos de la investigación

Dentro de los objetivos planteados para el desarrollo de la investigación se tienen los siguientes:

1.2.1. Objetivo General

Construir el mapa de emplazamiento idóneo de proyectos de microgeneración eólica para Colombia, usando el método multicriterio y la perspectiva del desarrollo sustentable.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Analizar el panorama a nivel mundial y contextualizar al lector del potencial del recurso eólico del país para determinar la metodología utilizada en la medición de la velocidad del viento en Colombia que pueda brindar información útil para emplazamiento de sistemas de microgeneración de energía eléctrica, priorizando las zonas no interconectadas y/o las regiones del STN con un buen potencial, para una futura interconexión con éste.
2. Buscar y determinar los planos de información de las entidades gubernamentales que están enfocados en los ejes de la sustentabilidad para hacer la simulación en el software QGIS y determinar los metadatos adecuados para el análisis estadístico multicriterio para la obtención del emplazamiento idóneo de sistemas de microgeneración eólica.
3. Plantear y generar la parametrización de los escenarios para la simulación en QGIS, enfocados en los tres ejes de la sustentabilidad para tener como resultado el emplazamiento de sistemas de microgeneración eólica en los municipios que sean determinados como idóneos.
4. Determinar las zonas de posible aplicación, teniendo en cuenta el marco legal y regulatorio colombiano, así como los fondos de inversión estatal que den viabilidad a este tipo de proyectos.

1.3. Tipo de investigación.

La investigación realizada es de tipo aplicada, cuantitativa y cuasi experimental; teniendo en cuenta que aborda un problema específico que cuenta con metadatos geográficos en contextos como el ambiental, el social y el económico; que son contemplados como atributos de decisión para un experimento estadístico.

2. Caracterización y aprovechamiento del recurso eólico en Colombia.

Con el deterioro del medio ambiente se está dando una tendencia global consistente en buscar alternativas de generación de energía limpia para garantizar un desarrollo económico y social, soportado en los pilares fundamentales de la sostenibilidad, donde se tiene muy en cuenta el impacto medioambiental generado por los procesos comunes del ser humano.

Por esta razón en este documento se hará un vistazo rápido de diferentes contextos globales y locales al respecto de esta temática. Un ejemplo de esta tecnología instalada en Colombia es el parque Jepirachi [2], que fue construido en la Guajira, exactamente en Uribia y está compuesto por dos filas de 15 turbomaquinas (dos filas de 8 y 7 turbinas) separadas una de la otra por 180 metros y de fila a fila por 1 kilómetro; este parque fue construido entre el 2002 y 2003 y que fue inaugurado el 21 de diciembre del 2003 y entró en operación el 19 de abril de 2004, este llegó a generar 120 GWh y su inversión fue de un aproximado de 28 millones de dólares, siendo operado por las Empresas Públicas de Medellín (EPM) [2]. El parque en mención se muestra en la Fig. 2-1.



Figura 2-1.: Parque Eólico Jepirachi, [2].

El recurso eólico es uno de los recursos naturales renovables considerados por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia como una de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) con un alto potencial para la generación de energía eléctrica, siendo ya considerado como un recurso disponible para su utilización en la última subasta energética, la primera en la que los proponentes incluyeron FNCER. Por lo tanto, la adecuada caracterización de esta fuente es vital para el emprendimiento de proyectos de microgeneración distribuida que puedan ser financiados por el Estado. Esto hace que sea necesario la tenencia de datos estadísticos oficiales que den cuenta de la variación en la cantidad del recurso renovable disponible en una área geográfica en particular, y que pueda ser usada para dimensionar de manera preliminar proyectos de Generación distribuida (GD), con FNCER con una adecuada perspectiva sustentable.[3]

En este proyecto se utiliza, el Atlas Eólico de Colombia, y en concreto el mapa sobre Velocidad Media del Viento Multianual, para estimar de manera preliminar la potencia nominal del generador eléctrico que será parte fundamental de la turbina eólica. También es posible dimensionar todo un parque eólico en el lugar energéticamente idóneo. Algunos conceptos fundamentales sobre energía eólica y la medida estadística de la velocidad del viento son también revisados con profundidad [3].

2.1. El recurso renovable y la energía alternativa.

En este apartado el lector encontrará definiciones básicas para poder comprender diferentes contextos que se tratarán más adelante y de este modo seguir un orden lógico que permita comprender las diferentes ideas expuestas a lo largo de este documento.

Por ejemplo, se definirá qué es un recurso renovable y se diferenciará con uno no renovable, se definirá lo que se entiende por energía alternativa, lo qué es una energía limpia, cómo se producen los gases de efecto invernadero, entre muchos más que se desglosan a continuación [4]:

2.1.1. Recursos renovables y no renovables.

El recurso renovable es considerado como aquel recurso natural que se puede restaurar por procesos naturales a una velocidad superior a la de su consumo. En contraste, el no renovable, es el recurso que es finito debido a su deficiencia en la recuperación respecto al aprovechamiento de su fuente.

Dentro de los recursos naturales se encuentran los siguientes: La radiación solar, las mareas, el viento, la energía geotérmica, el agua dulce, la madera y la biomasa, entre otros; de los cuales se contemplan como recursos perdurables que aportan a la sostenibilidad ambiental

debido a su fortaleza de recuperación y de producción de recurso constante.

Adicionalmente, este tipo de utilización de recursos hace mucho bien al planeta debido a que la producción de gases de efecto invernadero es mucho menor a los producidos habitualmente. Por tal razón es que se crea un indicador llamado «huella de carbono», el cual hace referencia a la cantidad de contaminación que genera un proceso económico, los medios de transporte y en general los seres humanos en sus labores cotidianas, y que genera un daño irreversible para el planeta y el medio ambiente. [2]

2.1.2. Energía alternativa.

Esta energía también se conoce con diferentes términos como energías renovables, limpias ó energía verde ya que provienen de los recursos naturales que se consideran como inagotables o que proceden de una fuente de producción primaria [4].

2.1.3. Energía Solar.

Es la energía que se obtiene del sol. Esta puede ser utilizada a través de placas solares de las cuales se absorbe la radiación solar y se transforma en electricidad que puede ser almacenada ó transmitida a la red eléctrica. ó con el aprovechamiento del calor (conocida también como solar térmica) y se sustenta por medio de intercambiadores de calor para su aprovechamiento [5].

2.1.4. Energía hidroeléctrica.

Conocida por la construcción de presas ó embalses de agua, las cuales contienen el agua a una altura superior a la de la turbina para que la caída del agua impacte sobre la turbina para generar movimiento que es aprovechado para generar energía eléctrica; también conocida como centrales hidroeléctricas.

Adicional a ello, es importante tener en cuenta el impacto ambiental que genera el empozoamiento de tan grandes cantidades de agua y su viabilidad turística y económica [4].

2.1.5. Energía geotérmica.

Esta energía nace en el corazón de la tierra, y se aprovecha las altas temperaturas de yacimientos bajo la superficie terrestre para la generación de energía a través del calor. Suelen encontrarse yacimientos geotérmicos desde 100 hasta 150 grados Celcius [4].

2.1.6. Energía maremotriz y undimotriz.

Las dos energías provienen del mar, pero la diferencia sustancial se encuentra en como se recolecta una de la otra: La energía maremotriz proviene del aprovechamiento del cambio de marea, de modo tal que cuando sube la marea se empoza el agua y en el momento que baja la marea se deja salir hacia el mar pasando por las turbinas, como ocurre en las centrales hidroeléctricas. Por el otro lado, la energía undimotriz hace referencia a la implementación de turbinas o flotadores en la superficie o dentro del mar para que el movimiento de las olas se aproveche y se genere la energía eléctrica.[2]

2.1.7. Energía de la biomasa.

Es contemplada como una de las más económicas y ecológicas de generar energía eléctrica en una central térmica por medio de la combustión de residuos orgánicos de origen animal y vegetal [4].

2.1.8. Energía proveniente del biogás.

Esta energía es producida biodegradando materia orgánica mediante microorganismos en dispositivos específicos sin oxígeno, produciendo un gas como combustible que se utiliza para producir energía eléctrica [4].

2.1.9. Energía eólica.

Es la energía que posee el viento. La cuál es aprovechada por el ser humano para la generación limpia de energía eléctrica o para la realización de un trabajo mecánico y así mejorar la calidad de vida. Como se evidencia en los molinos de viento que desde hace mucho tiempo se utilizan para la ayuda en la trituration de semillas, para la navegación a vela, para bombear agua, entre otras aplicaciones más. En la actualidad, la implementación de aerogeneradores para convertir la energía cinética del viento en electricidad y suplir la demanda energética de las labores cotidianas [6].

La Fig. 2-2 hace alusión al ejemplo de aerogeneradores planteados anteriormente.



Figura 2-2.: Energía Eólica.

[7]

2.1.10. ¿Qué es el viento?

Es el movimiento de una masa de aire, el cual es conocido como una corriente de aire que se produce en la atmósfera por causas naturales, la cual se caracteriza por tener una velocidad y un sentido, que dependen de las condiciones ambientales.

Sintetizando la definición es el movimiento de las partículas que componen el aire, las cuales dependen de estímulos externos como cambios de temperatura y presión, ya que estos producen aumento o disminución del movimiento de las partículas. [6]

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se muestra en la siguiente Fig. **2-3** la interacción del viento con el medio.



Figura 2-3.: El viento.

2.1.11. ¿Qué es la velocidad del viento?

Es la magnitud física que mide la cantidad de movimiento de la masa de aire en unidad de tiempo; la cual depende del entorno y las condiciones ambientales en las que se encuentre. Por tal razón la cantidad de energía cinética con la cual se desplazan las partículas son directamente proporcionales a la energía suministrada por el entorno al aire.

Teniendo en cuenta que para la medición de la velocidad del viento se utiliza el anemómetro, pero también, la escala de BEAUFORT que se basa en las características o comportamientos evidentes en el entorno para determinar la velocidad.[6]

2.1.12. Velocidad promedio del viento.

Para determinar la velocidad promedio del viento, se deben definir parámetros específicos; los cuales son variables dependientes del comportamiento del recurso y por ende de los datos a obtener; por tal razón es importante definir el dato de altura sobre el nivel del mar se va a trabajar, el ángulo en el cual se desplaza, viento zonal (este, oeste), viento meridional zonal (norte, sur) y cantidad de datos representativos para realizar iteraciones y generar un dato promedio exacto.

Para ello se hace uso de una herramienta estadística conocida como distribución de Weibull, la cual nos genera los m/s a los cuales tiende a estar esa zona en especial.[6]

2.1.13. Recurso eólico en Colombia.

Para la implementación de proyectos de microgeneración y generación distribuida en el país, es importante contar con estudios de comportamientos del recurso a utilizar, por esta razón se ha creado el Atlas de Viento Colombiano, el cual consiste en una colección de mapas que muestran la distribución espacial del viento en la superficie y su potencial energético a diferentes alturas, presentando reportes de forma mensual y anual, que son creados por el IDEAM por medio de la recopilación del comportamiento del a nivel nacional con anemómetros en las 111 estaciones meteorológicas y 122 puntos de grilla.[6]

2.1.14. Distribuciones estadísticas para modelar la velocidad del viento.

Las distribuciones estadísticas son herramientas matemáticas que se utilizan para tratar una gran cantidad de datos y condensarse en un dato más específico, de modo tal que sean más fáciles entender y contextualizar. Dependiendo de la característica de los datos y de la necesidad, en la estadística se manejan diferentes distribuciones para el tratamiento de datos, las más utilizadas son: La distribución de RAYLEIGH, La distribución LOGNORMAL, La distribución GAMMA y la distribución de WEIBULL.[8]

Estas distribuciones son además útiles en la ingeniería de la energía porque permiten modelar estadísticamente los datos sobre velocidad del viento y dar cuenta de un valor promedio dependiendo de cómo estén formuladas y cómo se agrupen los datos, por lo tanto, se analizará con más detalle las distribuciones anteriormente citadas.[9]

2.1.15. La distribución de Rayleigh.

Es una función de distribución continua y se utiliza cuando el vector a analizar es bidimensional, teniendo sus dos componentes ortogonales e independientes, utilizada para desarrollo de números complejos, entre otros, como para la representación de la velocidad del viento, Ver Ecuación (2-1). [8]

$$f(x) = \frac{2x}{b^2} \exp\left(-\frac{x^2}{b^2}\right) \quad \text{Donde} \quad x \geq 0 \quad (2-1)$$

La función $f(x)$ representa la probabilidad de que la velocidad del viento x esté en un intervalo entre x y $x + dx$. El área bajo $f(x)$ es la unidad.

2.1.16. La distribución Lognormal

La distribución Lognormal es muy utilizada en el ámbito de las finanzas para verificar la fiabilidad y poder modelar el comportamiento de las acciones. Se sugiere utilizar cuando las variables sean mayores a 0, además esta función es muy parecida a la distribución de Weibull, Ver Ecuación (2-2). [9]

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(x-\lambda)} \exp\left(-\frac{(\ln(x-\lambda) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2-2)$$

Donde μ y σ son la media y la desviación estándar del logaritmo de variable x .

2.1.17. La distribución Gamma

Es una distribución de probabilidad basada en modelar el comportamiento de variables aleatorias positivas respecto al tiempo, muy utilizado para procesos experimentales, Ver Ecuación (2-3).

$$f(x) = \left(\frac{1}{\alpha\Gamma(\rho)}\right) e^{-\frac{x}{\alpha}} x^{\rho-1} \quad (2-3)$$

En su expresión se encuentran dos parámetros, siempre positivos, α y β de los que depende su forma y alcance por la derecha, y también la función $\Gamma(\alpha)$, responsable de la convergencia de la distribución. [8]

2.1.18. La distribución de Weibull

Esta distribución toma este nombre debido al nombre de su creador el Ingeniero y matemático sueco Waloddi Weibull; esta función está definida por dos parámetros de valores positivos y mayores que cero, llamados factor de forma (K), el cual es adimensional y se calcula por medio de una gráfica de regresión lineal dada en sus ejes x con la función $x = \ln(1 - F(v))$ y en el eje y con la función $y = \ln[-\ln(1 - F(v))]$; el segundo es un factor de escala (C) que es un parámetro de escala que dependerá de las variables establecidas en cada proceso siendo el valor del parámetro el indicador de la velocidad promedio del lugar, en pocas palabras la velocidad con más frecuencia.[9]

En conclusión, esta función de probabilidad se utiliza para describir la curva de frecuencias de velocidad del viento obtenida por las estaciones captadores de información por medio de los instrumentos en un determinado tiempo y debido a su comportamiento variable; poder

determinar una velocidad promedio estandarizada más cercana al porcentaje de probabilidad de la producción de esta velocidad en dicho tiempo y espacio, Ver Ecuación (2-4). [8]

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \times \left(\frac{k}{c}\right)^{k-1} \times e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2-4)$$

Depende de dos parámetros denominados c y k , como se muestra en la Ecuación (2-4) y en la Fig. 2-4. Se calculan como la pendiente de la recta de ajuste $p(1)$ es el parámetro k y El parámetro c se determina a partir de k y la ordenada en el origen $p(2)$.

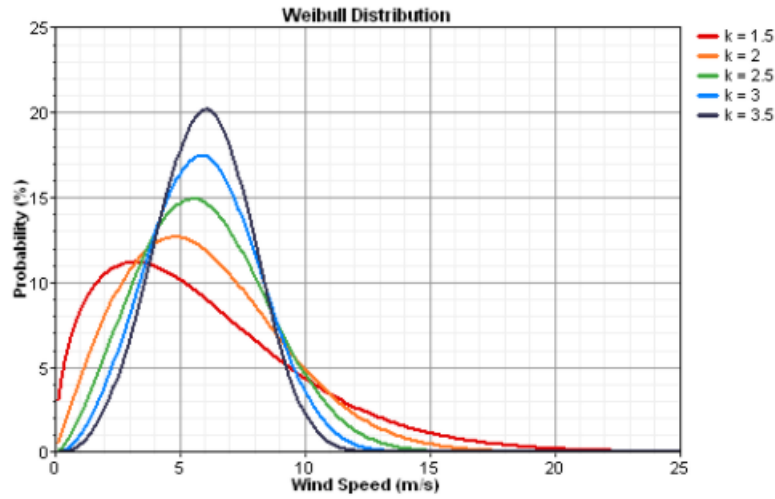


Figura 2-4.: Distribución Weibull.
[8]

2.1.19. Atlas colombiano de velocidad del viento a 50m de altura.

El IDEAM maneja dos tipos de mapas de información del comportamiento del viento en Colombia y se diferencian en la información; uno que define la velocidad del viento mensual, multianual y el otro la densidad del viento mensual, multianual. Su cambio fundamental es la magnitud y el valor de la densidad por la velocidad del viento; ya que se manejan a los mismos 50 metros respecto al piso. Para este trabajo de investigación se decide utilizar el mapa de velocidad del viento en m/s .

Se estructura en cinco partes o capítulos, de la siguiente manera: en su primera parte cuenta con 12 mapas mensuales y un mapa anual que indica la velocidad promedio del viento en un área de 10x10 kilómetros utilizando modelos físicos con los datos de las estaciones para promediar su comportamiento, labor que es estrictamente realizada por el IDEAM, CENICAFE y la CAR.

La segunda parte tiene los 12 mapas mensuales con la desviación estándar del viento en la superficie, los cuales permiten cuantificar el grado de dispersión de la velocidad promedio utilizando de referencia la base de datos SISDHIM (base de datos hidrometereologica) [6].

La tercera, cuenta con 12 mapas mensuales de sesgo del viento en superficie, con este parámetro estadístico lograr definir la asimetría negativa cuando existe una frecuencia importante de velocidades altas utilizando como base el software TRAMO de ARIMA.

El cuarto capítulo muestra el ciclo diario del viento en 16 lugares del país en los que a nivel mensual o anual se muestran velocidades de viento aprovechables para la generación de energía eólica utilizando el software de programación Delphi 5.0 bajo la plataforma de Windows, para ser calculado a través del lenguaje SQL.

Por último, se tiene una colección de 26 mapas, en los que se tienen 12 mapas mensuales y uno anual de la densidad de la energía a 20 metros de altura, interpolada a una resolución de 10x10 km y otros 12 mapas mensuales y uno anual a 50 metros de altura interpolada con la misma resolución; para éstos cálculos es necesario saber la densidad del aire, la cual se halla por medio de la fórmula de los gases ideales con los datos promedios mensuales multianuales de la temperatura del aire registrada en las 685 estaciones y las 38 estaciones, para así determinar la presión atmosférica [6].

Con respecto a la información anteriormente mencionada, se tiene como apoyo cuatro anexos para la aclaración e interpretación de los mapas, que son desglosados a continuación: El primero explica los aspectos básicos del movimiento del aire, las causas del fenómeno, las fuerzas que lo genera y las diferentes condiciones, cómo interviene el calentamiento diferencial producido por el sol sobre el aire para producir la energía cinética, la cual es utilizada para generar electricidad por medio de aerogeneradores; dentro de las fuerzas más importantes se encuentra la fuerza gradiente de presión o diferencia de presión atmosférica, la fuerza de Coriolis (que es la desviación del viento debido a la rotación de la tierra), la fuerza centrífuga que aparece con las curvas de las trayectorias del aire en movimiento y por último, la fuerza de rozamiento, la cual es muy importante cuando la revisión se hace cerca al suelo, ya que las diferencias en el terreno redundan en comportamiento de las fuerzas del viento variables [6].

En el segundo anexo básicamente se explica el por qué modelar el viento en la superficie es muy complejo, debido a la variación de las diferencias cartográficas del país y a la dependencia de los anemómetros para la verificación de la tendencia de estos flujos de aire. El tercer anexo explica el procedimiento estadístico realizado con los datos recolectados de los anemómetros para la generación de los mapas, por tal razón se utiliza como primera fase la complementación de los datos por medio de modelos autorregresivos integrados de media móvil denominados ARIMA, que consignan los test estadísticos para determinar un viento homogéneo dentro de una serie de tiempo, llevado de la mano con la tendencia estacionalidad, ciclicidad y aleatoriedad. En la segunda fase explica la metodología para determinar

la distribución probabilística Weibull del viento que se utiliza para la proyección de la implementación de los parques eólicos. El último anexo habla del modelamiento físico hecho para generar la distribución espacial de los campos del viento y el potencial del recurso a distintas alturas, teniendo en cuenta características de rugosidad y demás factores relevantes descritas anteriormente [6].

2.1.20. Rosa de viento.

Es la representación gráfica de la velocidad del viento con su respectiva dirección en un punto específico; o en pocas palabras, de dónde viene el viento y cuál su intensidad.

Algo importante dentro del análisis de este tipo de gráficos es su dirección, las cuales son comprendidas por: Norte (N) a 0°, Noroeste (NW) a 315°, Oeste (W) a 270°, Suroeste (SW) a 225°, Sur (S) a 180°, Sureste (SE) a 135°, Este (E) a 90° y Noreste (NE) a 45° respectivamente.

Adicional a tener en cuenta son las unidades de medición de esa velocidad de viento, entre las más conocidas están: kilómetros por hora (km/h) y metros por segundo (m/s). Lo anteriormente descrito se puede evidenciar en la siguiente Fig. 2-5, en la que, a modo de ejemplo, se presenta una de rosa de viento [10].

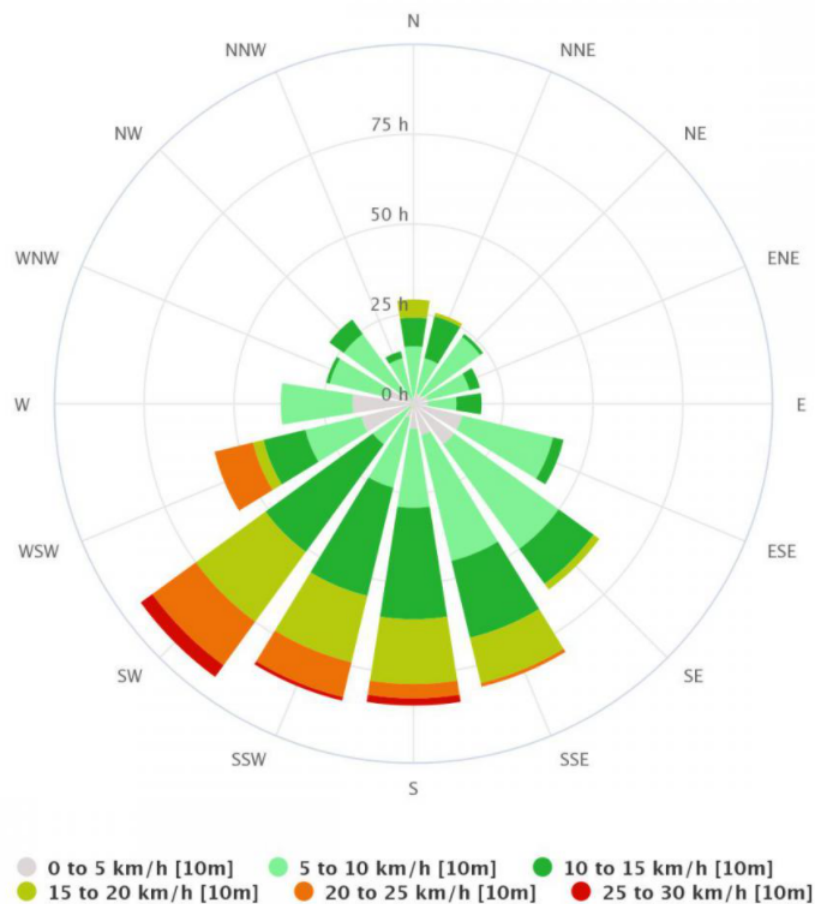


Figura 2-5.: Rosa de viento.

[10]

2.1.21. Altura de las corrientes de viento.

El viento se produce en infinidad de distancias con respecto al piso, pero dentro de las más usuales para implementar aerogeneradores se encuentran intervalos entre los 25 y los 100 metros; debido a la eficiencia en la generación.

Teniendo en cuenta que la altura varía dependiendo de los factores externos que nos ofrezca el sistema, tales como la presión, la temperatura, la altura, la cercanía al mar, las cordilleras y cualquier característica en específico que tenga el lugar de implementación. Sin embargo, normalmente la altura del aerogenerador se encuentra en el rango anteriormente mencionado [6].

2.2. Sistemas de Generación de Energía Eólica

Adicional al recurso, se necesita de dispositivos para poder aprovechar el potencial energético generado a partir del viento, en este apartado esto es llamado caracterización del sistema. Se detallan los diferentes tipos de turbinas eólicas, las más comunes e implementadas para este tipo de aplicaciones energéticas, el conocimiento de sus partes principales, funcionamiento y clasificación de los tipos de aerogeneradores dependiendo de su configuración de conversión energía [11].

2.2.1. Resumen Histórico de la Evolución de los Aerogeneradores



Figura 2-6.: Aerogeneradores.
[11]

El la Fig. 2-6 se muestran tipos de aerogeneradores que han sido mejorados basándose en los aerogeneradores que se comenzaron a usar a comienzos de la década de los 70s de forma masiva en EEUU, por lo que diferentes tipos de máquinas eléctricas han sido estudiadas facilitando su aplicación en proyectos energía eólica y de este modo contribuir con un impacto positivo al medio ambiente.

A lo largo de la historia se evidencian algunos pasos y aportes importantes, como los de Charles Brush, quien fue la persona que creó la primera empresa constructora de aerogeneradores, teniendo especificaciones de diámetro de rotor iguales a 17 *m* y 144 aspas de madera de cedro, con una vida útil de 20 años y una producción energética de 12 *kW*.

También se tiene en cuenta en la energía eólica, la evolución industrial al señor Poul La Cour, quien fue la persona que fundó la primera academia que especializaba personas en el conocimiento de los aerogeneradores, debido a la necesidad planteada por la escasez de combustibles fósiles.

Un poco después se tiene el aporte de Albert Betz, físico alemán que planteo la teoría del límite de Betz ya que con esta teoría se trata de extraer el mayor porcentaje de energía cinética del viento para ser transformada en energía eléctrica y satisfacer las necesidades de la humanidad, teniendo en cuenta que su planteamiento se basa en el óptimo diseño de las aspas, siendo estas las captadoras y las que aprovechan la mayor cantidad de energía.

Es importante resaltar que en la actualidad los aerogeneradores más utilizados, debido a sus características para la transformación de la energía y la facilidad de interconectarse con la red y su respectivo transporte [11].

En Colombia la implementación de esta tecnología se empezó a realizar en los años 50 pero su utilidad principal se centró en actividades de bombeo de agua, sin embargo, en los países europeos y en Estados Unidos, esta tecnología estaba mucho más desarrollada y los diseños se utilizaban como punto de referencia para replicarse en Colombia; si bien es cierto que el proceso ha sido lento, sí han habido avances significativos, por ejemplo, en los años 90 el IDEAM empieza a generar los primeros mapas eólicos basados en la información meteorológica del territorio colombiano; para el siglo XX se logra implementar el primer parque eólico llamado Jepirachi, el cual está ubicado en la región nororiental de la costa atlántica, en el municipio de Uribia en la Guajira, que alcanzó a generar energía eléctrica, por medio de 15 generadores en un espacio de 1Km cuadrado y con un viento promedio de 9,8 m/s y una potencia Nominal de 19,5 MW [12].

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, la necesidad de incluir en las matrices de energía a nivel mundial el uso de la energía eólica. Colombia no es la excepción, sin embargo, su desarrollo todavía es incipiente, destacándose apenas los proyectos de parques eólicos como Jepirachi. Es necesario por lo tanto, conocer en detalle el funcionamiento y la operación de los diferentes tipos de aerogeneradores además de sus ventajas y desventajas. Por ello, se establecen a continuación algunas generalidades de los aerogeneradores y se exponen conceptos sobre su funcionamiento, sus partes más importantes y se presenta una posible clasificación.[11]

2.2.2. Partes básicas ó componentes de una turbina eólica

En la Fig.2-7 se muestran las partes principales de un aerogenerador, las cuales son descritas a continuación:

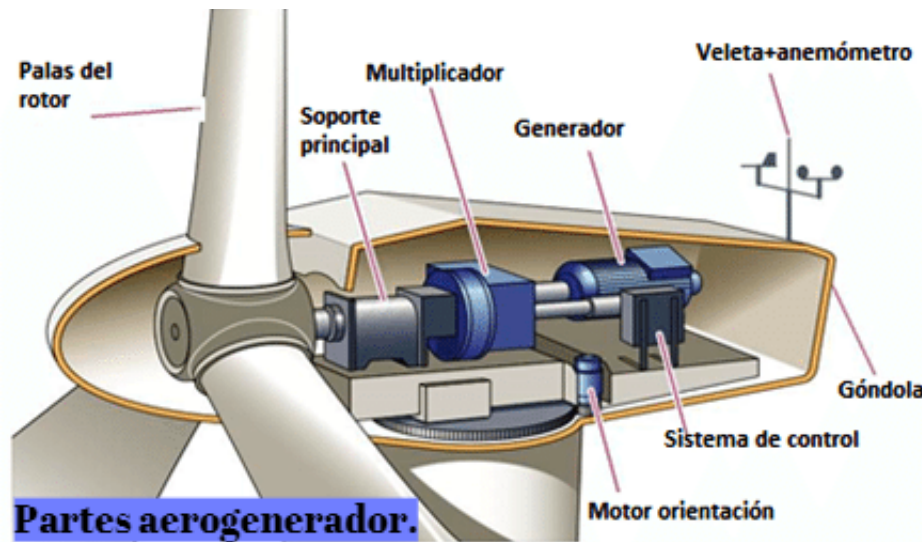


Figura 2-7.: Partes de un aerogenerador de eje horizontal.
[12]

Pala de rotor:

Es el elemento que recibe el impacto de la velocidad del viento para aprovechar condiciones específicas de aerodinámica captando la energía cinética del viento para convertirla en energía eléctrica.

Góndola:

Es el elemento que contiene todo el sistema transformador y controlador de la energía del viento en eléctrica.

Motor de orientación:

Este elemento es utilizado en aerogeneradores robustos para generar un movimiento adecuado de las palas del aerogenerador, de modo tal que sea la posición adecuada para aprovechar la energía cinética del aire.

Veleta:

Es un elemento instalado en la góndola del aerogenerador de modo tal que muestre fácilmente la dirección del viento para que este sea aprovechado.

Multiplicador:

Es el sistema de transmisión que aumenta las revoluciones de entrada del rotor para aumentar la capacidad de producción de energía eléctrica.

Generador:

Se conoce como el dispositivo que convierte o transforma la energía mecánica giratoria en eléctrica, teniendo en cuenta la ley de Faraday, convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica por medio de un conjunto de piezas que trabajan solidarias entre sí, para poder hacer la conversión de esta energía natural en una de aprovechamiento sustentable para el ser humano en sus labores diarias.[11]

Sistema de control:

En este sistema se pueden tener varios sistemas, dentro de los más representativos están los de regulación aerodinámica; que se basan en el cambio de la geometría de los álabes con respecto al viento, de modo tal que no se aproveche la energía. También está el control electrónico, que se basa en procesar la velocidad del rotor y dependiendo de la capacidad del sistema desplazar el generador, dando una producción constante, necesaria, evitando daño de sistemas por sobreproducción.

Conductores:

Es el medio por el cual se conduce la energía en forma de electricidad, produciendo un movimiento de electrones y una resistencia al paso de los mismos dependiendo de su calibre.

Soporte o torre:

Como su nombre lo indica es la base que sostiene y le da la altura deseada al aerogenerador, de modo tal que su aplicación sea la más efectiva.

2.3. Clasificación de los aerogeneradores.

Para la generación de energía eléctrica por medio del aprovechamiento de la energía del viento se tienen diferentes tipos de generadores, todo dependiendo de las características del comportamiento del recurso y su entorno en específico; así mismo será la aplicación de cada uno de ellos, teniendo en cuenta la importancia de los convertidores electrónicos utilizados para mejorar la eficiencia del aerogenerador; pero entre los más utilizados están los siguientes: [12]

2.3.1. Según el número de palas.



Figura 2-8.: Tipos de aerogeneradores según el numero de palas.
[12]

En la Fig.2-8 se evidencian los tipos de aerogeneradores según su número de palas; los cuales serán descritos a continuación.

Aerogeneradores mono pala:

Como su nombre lo indica son aerogeneradores que se caracterizan por tener solo una hélice para captar la energía cinética del viento y ser transformada en eléctrica; por ende, su eficiencia es inferior a la de los aerogeneradores multi pala.[13]

Aerogeneradores multi pala:

Para este tipo de aerogeneradores su característica es de tener más de una pala o hélice, lo que hace que su nivel de eficiencia sea mucho mayor; teniendo en cuenta que su eficiencia no depende o es directamente proporcional a la cantidad de hélices.[13]

2.3.2. Según la posición del rotor.

Aerogeneradores barlovento:

En este caso el sentido del viento llega de frente al rotor, de este modo impacta en las hélices del aerogenerador produciendo el movimiento del rotor y la transformación de la energía por medio de sus sistemas internos.[13]

Aerogeneradores sotavento:

En estos aerogeneradores la proyección o sentido del viento se genera por la parte posterior del rotor, que sin embargo realiza la misma función de transformar la energía cinética del viento en eléctrica, esto debido a la disposición y diseño de sus aspas. [12]

2.3.3. Según el anclaje de sus hélices al buje.

Aerogeneradores de paso variable.

Para este caso, las palas del aerogenerador rotan sobre el eje longitudinal del mismo.

Aerogeneradores de paso fijo.

En este caso las palas del aerogenerador se encuentran fijas al rotor.

2.3.4. Según el tamaño y potencia.

Estas características en el aerogenerador son muy importantes porque a mayor altura se obtiene mayor velocidad del viento, por lo tanto, el diámetro de cobertura de las aspas o hélices representan la cantidad de viento que se podrá abarcar en un área determinada en m². Además, cada diseño está limitado por la potencia nominal, la cual es importante para el abastecimiento de energía requeridos por los usuarios.[13]

2.3.5. Según la disposición del eje de trabajo.

Teniendo en cuenta que de las características importantes en el funcionamiento habitual de un aerogenerador de este tipo son las aspas, ya que estas necesitan como mínimo una fuerza de viento para vencer la estática del rotor, la cual es relativamente pequeña y que va directamente proporcional con el área de barrido, también conocido como área superficial de barrido, el cual se debe multiplicar con una constante (0,785 o 1,0 respectivamente)

dependiendo del caso; ya sea HAWT (turbina de eje horizontal) o VAWT (turbina de eje vertical).

La turbina de eje vertical fue muy utilizada como molino de viento, siendo su función la de triturar semillas y granos. Al inicio de su uso como aerogenerador su eficiencia era bastante baja, con el avance de la tecnología de materiales y de electrónica de potencia, así como los constantes rediseños realizados (las aspas y su cantidad, los ángulos de ataque con respecto al viento y su transmisión de la energía), se ha logrado el incremento de su eficiencia [12].

Aerogeneradores de eje horizontal según movimiento de las palas

La característica principal de este tipo de aerogeneradores es la disposición de su eje con respecto al piso, como su nombre lo indica el eje principal o rotor se encuentra paralelo con respecto al piso, por ende, toma el nombre de aerogenerador horizontal. Teniendo en cuenta que a dicho eje se acoplan las palas que transforman la energía del viento para ser transformada en energía mecánica y finalmente en eléctrica.[13]



Figura 2-9.: Aerogenerador de eje horizontal.

[13]

Teniendo en cuenta la Fig. 2-9 y lo anteriormente mencionado acerca de este tipo de aerogenerador, es importante resaltar algunas ventajas y desventajas en su implementación:

Ventajas:

- Es eficiente.
- Es muy utilizado.
- Es económico.
- Tiene bastantes modelos
- Se puede aprovechar vientos en alturas mayores a mayor velocidad.
- Se puede modificar el ángulo de ataque de las aspas.

Desventajas:

- No interactúa bien con cambios frecuentes en la dirección del viento.
- No trabaja adecuadamente con vientos turbulentos.
- La instalación es más compleja, debido a la altura de los aerogeneradores.
- Dependen de la dirección del viento.
- Son un peligro para las aves.

Turbinas de eje vertical.



Figura 2-10.: Aerogenerador de eje vertical.

Su característica principal es la disposición del eje respecto al piso, para este caso el eje se encuentra perpendicular al suelo. No necesitan de un dispositivo de orientación, puede operar con velocidades de viento menores y no requiere de gran fuerza de giro, como se evidencia en la Fig.2-10.

Existen cuatro tipos de aerogeneradores verticales:

El tipo **Darrieus**, compuesto por dos o tres arcos que giran de manera solidaria al eje, produciendo potencia y energía con el aprovechamiento de la velocidad del viento.

El tipo **Savonius**, comprende la misma disposición al aerogenerador anteriormente descrito solo que cambian los arcos por cilindros, de modo tal que aproveche la energía del viento para la producción de electricidad.

El tipo **Giromill**, es característico por sus palas verticales unidas al eje por brazos horizontales que funcionan como una turbina cilíndrica solidaria que aprovecha cualquier tipo de viento que la haga girar en algún sentido; ya que solo necesita de la energía del viento para su funcionamiento. Por último.

El tipo **Windside**, que consiste en brazos giratorios unidos que buscan aprovechar las corrientes de aire dentro de sus palas abatibles que ofrecen alta resistencia al cumplir su función.[13]

Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus y H-rotor.

El Darrieus tipo H o Giromills, se pueden evidenciar en la Fig.2-11 y el cambio sustancial se da con el cambio de las turbinas por alerones verticales de eje recto llamadas Giromills los cuales pueden cambiar el ángulo y el sentido de trabajo de la turbina. Por último, se tiene el aerogenerador Windside, el cual fue desarrollado por la empresa finlandesa que tiene dicho nombre, el cual en su concepto consta de alerones helicoidales alrededor del eje, de modo tal que aproveche cualquier presencia de viento, siendo capaz de producir 50 kW en su etapa de prueba.[13]

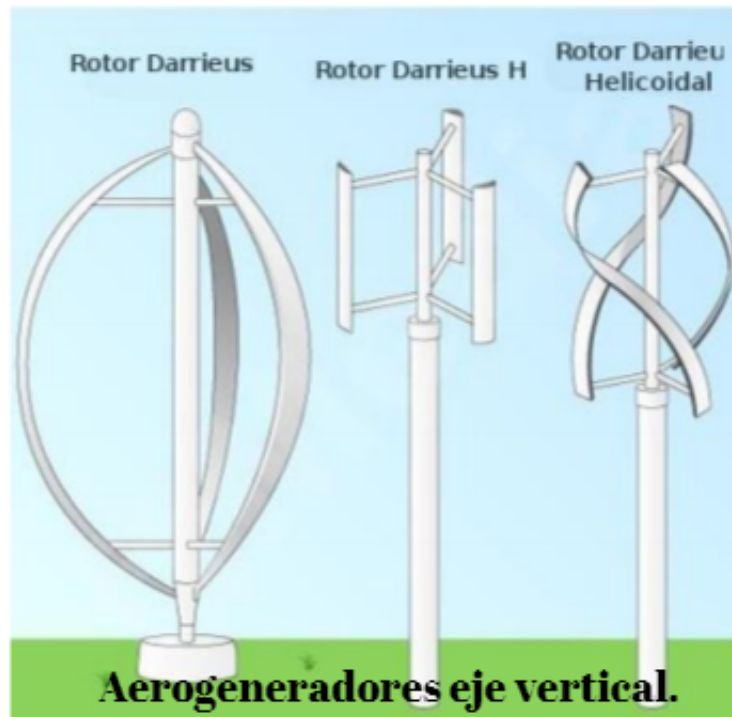


Figura 2-11.: Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus
[12]

Este tipo de aerogeneradores tienen una serie de ventajas y desventajas, donde se tiene en cuenta como punto de vista económicos de compra, mantenimiento, eficiencia, funcionamiento, entre otros indicadores importantes: [14].

Ventajas:

- Pueden ser empaquetados más juntos en parques eólicos, permitiendo más en un espacio dado.
- Es eficiente.
- No le afecta la dirección del viento.
- Están mas pegados al suelo.
- Su mantenimiento es fácil por estar más pegado al suelo.
- Maneja un rango mínimo de vibraciones.
- Trabajan con velocidades de viento bajas.
- No genera mucho ruido.

Desventajas:

- Poco utilizado a escala comercial.
- No son resistentes a turbulencias.
- No generan suficiente electricidad para que la contabilidad del ciclo de vida completo muestre que son ventajosos en cuanto a costos o materiales base sobre los aerogeneradores de eje horizontal.
- Los vientos con velocidades extremas tienden a deformar o romper las palas.

Aerogenerador de eje vertical tipo Savonius.

El aerogenerador tipo SAVONIUS, se puede evidenciar en la Fig.2-12 y tiene una distribución en forma de S vista verticalmente y son dos baldes cortados a la mitad y su eficiencia es tan poca que se sugiere solo para aplicaciones pequeñas llegando a un 30 %; por tal razón unas de las aplicaciones más afines para este tipo de aerogenerador es como molino o para extraer agua de pozos.[15]

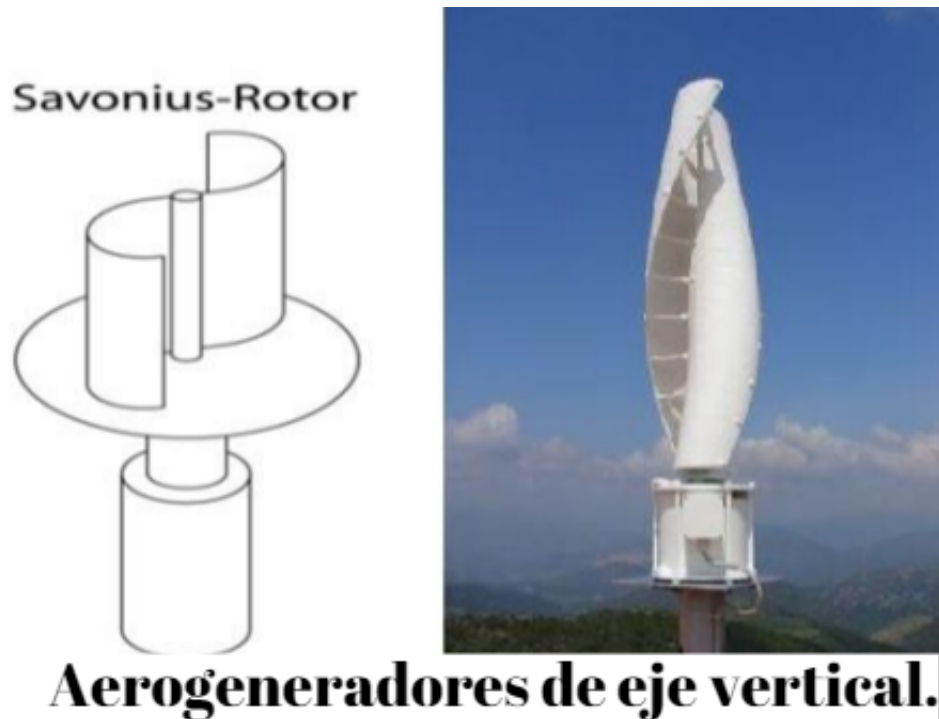


Figura 2-12.: Aerogenerador de eje vertical tipo Savonius
[12]

Ventajas:

- Es eficiente.
- No le afecta la dirección del viento.
- No es tan sensible a las turbulencias.
- Maneja un rango mínimo de vibraciones.
- Trabajan con velocidades de viento bajas.
- Su montaje no es tan complejo.
- No son tan peligrosos para las aves.
- Ocupan menor espacio por su disposición.
- No genera mucho ruido.

Desventajas:

- Económicamente costoso.

- La producción de energía es menor que la de los aerogeneradores de eje horizontal.

2.4. Tipologías más comunes del conjunto aerogenerador-convertidor de potencia.

2.4.1. Generador Síncrono de Imán Permanente.

Este generador se caracteriza porque el convertidor puede ser un rectificador no controlado conectado al estator por medio de un bus CC, siendo conectado a la red con un variador de tensión VSI. El convertidor tiene un control tipo PWM asociado con signo senoidal de referencia y permite extraer la potencia máxima del bus CC, teniendo en cuenta que el rotor gira con velocidad variable y la tensión inducida del estator es rectificada por medio del VSI adaptando la tensión y frecuencia a los dos sistemas eólicos y de control de potencia para proporcionarla a la red. Ver Fig.2-13.[16]

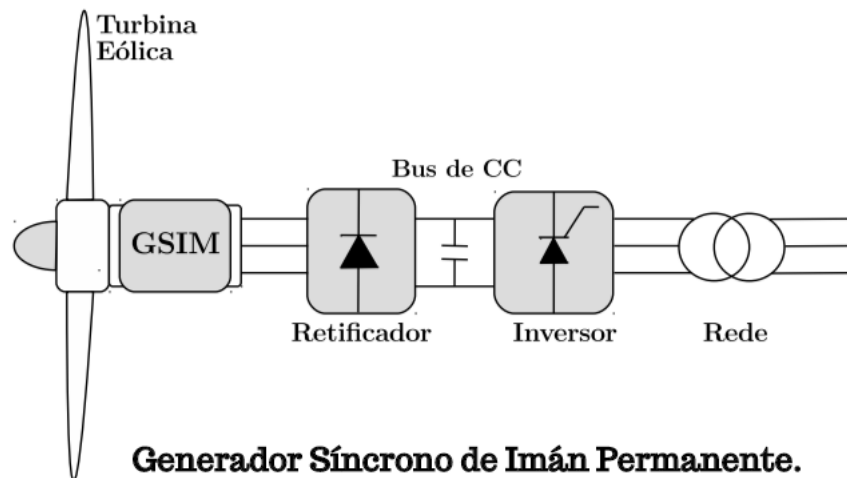


Figura 2-13.: Generador Síncrono de Imán Permanente.
[16]

También se encuentra otra alternativa de conectar el generador de imán permanente debido a la estructura de su distribución y su mejora de eficiencia debido a ella.

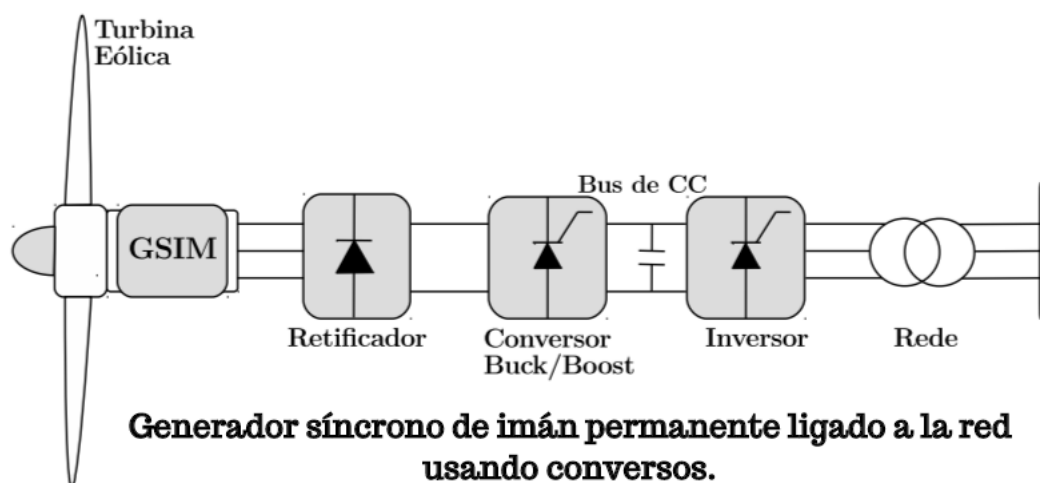


Figura 2-14.: Generador Síncrono de Imán Permanente ligado a la red usando convertors.
[16]

Teniendo en cuenta la disposición anterior se evidencia que su gran diferencia es la implementación de un conversor Buck Boost de CC, de modo tal que este pueda generar energía con tensiones bajas y disminuir los componentes armónicos de la tensión de la red; de moto tal su eficiencia aumenta. Ver Fig. 2-14.

Esta tipología de generador tiene ciertas ventajas, entre las más representativas se encuentran:

- Costos de mantenimientos y de operación bajos.
- Alta potencia de salida sin aumentar la capacidad del generador.
- Perdidas pequeñas en el rotor.
- Perdidas mínimas en el conversor electrónico de potencia.

Pero así mismo como tiene ventajas tiene sus desventajas, dentro de las más importantes están:

- El costo inicial de implementación es elevado por sus componentes.
- Las temperaturas elevadas generan sobrecargas en el sistema y tiende a desmagnetizarse los imanes.
- La configuración es apto para parques eólicos pequeños.
- El conversor debe ser sobre dimensionado mínimo 1,2 veces la potencia nominal.
- El rendimiento varía dependiendo de la temperatura y la frecuencia.

2.4.2. Generador de Inducción Jaula de Ardilla.

Este generador es conocido también como generador jaula de ardilla asincrónico que se puede ver en la Fig.2-15 y va conectado directamente a la red eléctrica por medio de un convertidor Back-to-Back. Este convertidor se utiliza para procesar la potencia entre el generador y la red, el convertidor está compuesto de dos convertidores que comparten un bus CC, puede ser usado para el control de potencia [16].

Hay que tener en cuenta que sus costos de mantenimiento no son elevados, son robustos, que deben tener protecciones y medios de desconexión de la red adecuados; para una óptima generación; debe tener una velocidad de rotación mayor a la velocidad de sincronismo o sino trabaja como si fuera un motor en el sentido contrario se presenta incremento en la temperatura dañando devanados y conexiones en general. Hay unas ventajas significativas en este tipo, por ejemplo:[16]

- Posee una excelente amortiguación de la pulsación de torque, debido a los cambios generados.
- El rectificador puede generar excitación programable para el generador.
- Los índices de fallo son muy pequeños debido a los diferentes sistemas complejos que se utilizan para regular todo el sistema.

Dentro de sus desventajas se tiene:

- Que necesita de compensación de potencia reactiva por medio de banco de condensadores y el descontrol de la velocidad y deslizamiento que afectan directamente la producción de energía a la red.
- Debe ser dimensionado para la potencia total del sistema y se debe realizar de manera muy específica, lo que eleva los costos.
- Se generan pérdida en el convertidor por el gran tamaño.

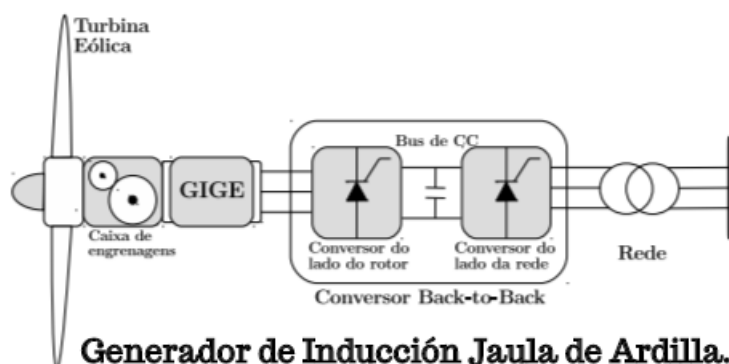


Figura 2-15.: Generador de Inducción Jaula de Ardilla.

[16]

2.4.3. Generador de Inducción Doblemente Alimentado.

Es denominado generador de doble alimentación debido a su característica de ser excitado desde el rotor y el estator de modo tal que los devanados del estator están conectados directamente a la red eléctrica y los del rotor a través de un convertidor de potencia. Ver Fig. 2-16.

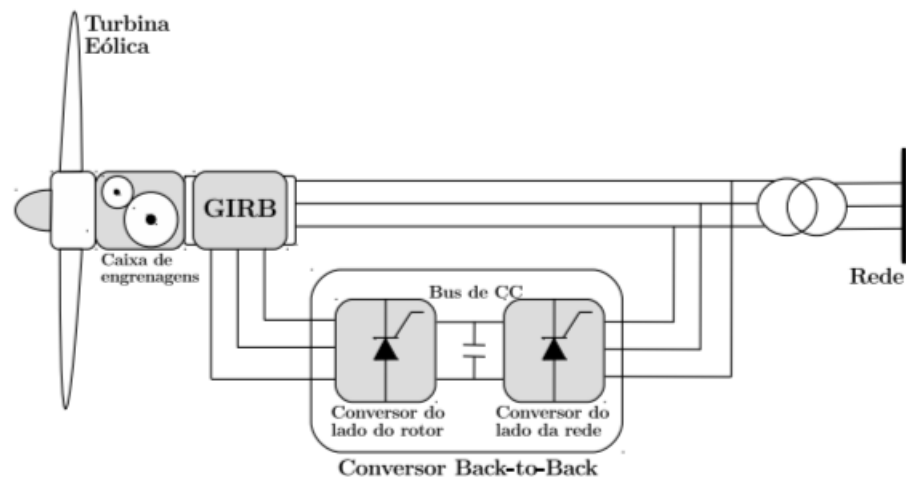
El convertidor Back to Back procesa solo el 30 % de la potencia del generador, lo que disminuye el costo del sistema de generación. Se utiliza un filtro entre el inversor y la red para controlar los armónicos generados por la conmutación del convertidor. [16]

Este tipo de generador cuenta con unas ventajas específicas entre ellas están:

- El costo del convertidor es poco.
- El convertidor genera o absorbe la potencia reactiva dependiendo si el generador es adecuado para alta potencia.
- Los convertidores solo controlan la potencia de deslizamiento del rotor por su robustez.

El sistema cuenta con desventajas como:

- La operación bajo el hundimiento de tensión puede dañar el convertidor de potencia.
- La bobina se conecta directamente y es susceptible a los disturbios de la red.
- Mayor sensibilidad y mantenimiento en el anillo deslizante en el disco.
- La distorsión armónica es mayor.



Generador de Inducción Doblemente Alimentado.

Figura 2-16.: Generador de Inducción Doblemente Alimentado.

[16]

2.5. Potencias de generación.

Para la generación de un potencial de energía eólica es importante conocer unos conceptos importantes, de los cuales se encuentran los siguientes:

2.5.1. Aerodinámica:

Esta palabra hace referencia a la fuerza y los movimientos que se ejercen en los objetos sobre los cuales atraviesa el aire, es común escuchar este termino debido a su utilidad en diferentes contextos, de los mas conocidos están; las alas de un avión y las características de los automóviles para mejorar su adherencia al piso y dar mas velocidad. Adicional a ello es importante en los aerogeneradores por el funcionamiento de sus paletas y para ello se utiliza el análisis por medio de la mecánica de fluidos.[15]

2.5.2. Viscosidad:

Esta propiedad hace referencia a la resistencia de un fluido a deslizarse libremente sobre una superficie o espacio. Teniendo en cuenta la diferencia de fricción, Denominada por la Ecuación (2-5).

$$t = \frac{F}{A} = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (2-5)$$

2.5.3. Flujo laminar:

En este concepto hace referencia al comportamiento de un fluido respecto a la dinámica que presente con otros cuerpos; de allí se puede determinar que un flujo laminar se comporta uniforme y un flujo turbulento es caótico o desordenado por alteraciones con el medio. Teniendo en cuenta lo anteriormente escrito aparece la funcionalidad del numero de Reynolds, ya que con este numero se puede catalogar que tipo de fluido se esta estudiando. Ver Ecuación (2-6).[15]

$$H_L = \frac{P_1 - P_2}{\rho} \quad (2-6)$$

2.5.4. Energía:

Se define como la capacidad que tiene la materia para producir un trabajo; que para nuestro caso es la energía cinética que posee el viento para hacer girar las palas de la turbina y generar energía eléctrica.

2.5.5. Eficiencia de la energía eólica:

Para calcular esta eficiencia es importante conocer la diferencia de energía cinética del fluido antes y después de atravesar la turbina del aerogenerador; normalmente no debe ser superior al 59 %. Ver Fig.2-17.[15]

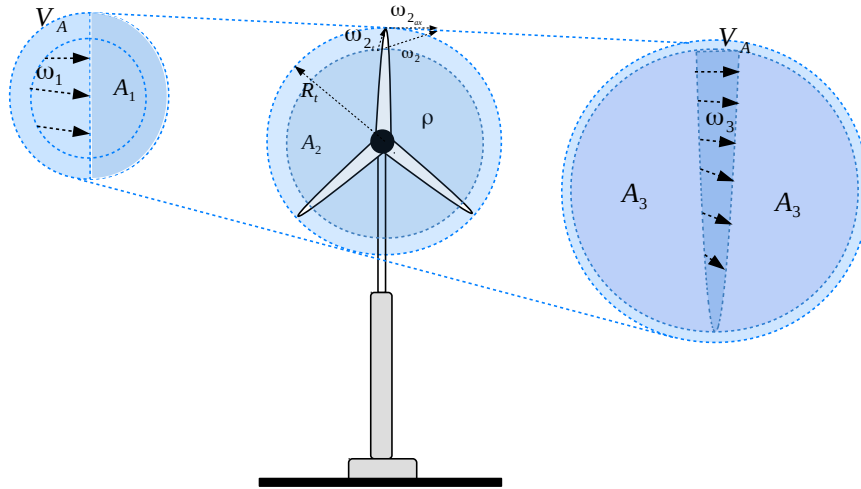


Figura 2-17.: Esquema Simple del Flujo de Aire a través de una Turbina Eólica
[15]

Ecuación de Rotor

El rotor de la turbina eólica se puede modelar teniendo en cuenta las Ecuaciones (2-7) y (2-8).:

$$P_{mec} = \frac{\rho}{2} c_p(\lambda, \theta) A_r \omega_w^3 \quad (2-7)$$

Donde, $c_p(\lambda, \theta) = 0,22\left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\theta - 5\right)e^{\frac{-12,5}{\lambda_i}}$ y $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\theta} - \frac{0,035}{\lambda^3 + 1}$.

P_{mec} es la potencia extraída del flujo de aire

Está dada en Vatios.

ω_w es la velocidad del viento en $[m/s]$.

ρ es la densidad del aire en $[kg/m^3]$. El coeficiente $\lambda = \omega_t/\omega_1$ es la razón entre la velocidad de la aspa (ω_t) y la velocidad del viento aguas arriba del rotor (ω_1) en $[m/s]$.

Límite de Betz

O también denotado como c_p es el coeficiente de desempeño o coeficiente de potencia A_r es el área cubierta por el rotor ($A_2 = A_r$). Adicionalmente, θ es el ángulo de Pitch y es dado en grados $[deg]$ este ángulo debe ser adicionado en (2-7), porque la potencia extraída del viento en una turbina eólica de velocidad variable es limitada por medio del control del Pitch.

La máxima potencia de salida de una turbina eólica fue dada por Betz y establece que ninguna turbina eólica puede convertir más de 16/27 o 59 % de la energía cinética del viento en energía mecánica en el eje del rotor (2-8):

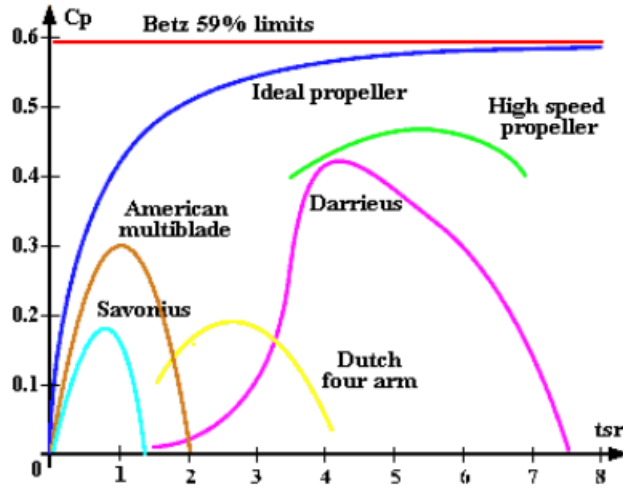


Figura 2-18.: Limite de Betz y eficiencia de los aerogeneradores [11].

En la Fig. 2-18 se puede evidenciar un plano cartesiano que en el eje X se encuentra denominado como tsr que hace referencia a la velocidad tangencial del aerogenerador ó las revoluciones por minuto de la turbina; en el eje Y se encuentra el Cp que hace referencia al coeficiente de desempeño o potencia de la turbomáquina.

Teniendo en cuenta que para la figura anterior se están evaluando los aerogeneradores más representativos hablando de la producción de energía.

$$P_{mec_{max}} = \frac{16}{27} A_r \frac{\rho}{2} \omega_1^3 \quad (2-8)$$

La ecuación (2-8) se obtiene usando $\omega_2 = \frac{2}{3}\omega_1$ e $\omega_3 = \frac{1}{3}\omega_1$.

2.5.6. Potencia de turbina eólica

Se considera como la densidad del aire que impacta las aspas, la cual varía dependiendo de la temperatura y la presión del ambiente. para su comprensión se utiliza la ecuación de los gases. Ver ecuación (2-9).

$$\rho = \frac{P}{RT} = 3,1837 \frac{P}{T} \quad (2-9)$$

Donde: P: Es presión de aire. T: Es temperatura. R: Constante del gas.

Potencia eólica

Se calcula teniendo en cuenta que el viento pasa por un espacio de área A a una velocidad Vv y la potencia es dada en Vatios, ver ecuación (2-10)[15]:

$$P_e = \frac{1}{2} * \eta * \rho * A * v_v^3 C_p \quad (2-10)$$

2.6. Otros componentes.

En el proceso de producción de energía, se debe tener en cuenta conceptos muy importantes como el almacenaje y transporte de la energía obtenida. Por esta razón, las baterías juegan un papel importante y de las baterías más usadas se encuentran las siguientes:

2.6.1. Batería de plomo ácido.

Son un tipo de batería primaria, basada en la teoría de celdas de Leclanché siendo la tecnología de almacenamiento de energía más antigua.

El ánodo o electrodo positivo está compuesto de dióxido de plomo, mientras el cátodo o negativo de plomo. En este tipo de baterías el electrolito interviene en forma activa del proceso electroquímico, variando la densidad de ácido en la solución, según el estado de carga.

La vida útil de estas baterías es baja, alrededor de 500 a 1000 ciclos, y una densidad de energía de 30 a 50 Wh/kg. Su eficiencia está entre 75-80 % con una vida útil de 5-15 años, que depende de la temperatura de operación.

Entre las ventajas mas importantes de este tipo de baterias de encuentra que son de bajo costo y tolerantes a un uso intensivo y entre las desventajas se tiene que estos sistemas requieren un mantenimiento constante.

Entre las ventajas más representativas esta que la bateria presenta un largo ciclo de vida, contando con más de 3500 ciclos combinados y bajos requerimientos de mantenimiento.

De las desventajas más importantes se tiene el alto costo de inversión, ya que son 10 veces mas caras que una de plomo ácido. Otra de las desventajas de las baterías de Niquel-Cadmio es la alta toxicidad del Cadmio y su difícil manejo de residuos peligrosos.[17]

2.6.2. Batería de Níquel-Cadmio.

Esta batería es de tipo alcalina la cual se remonta a la década de los años 50; El material del electrodo positivo es hidróxido de níquel mientras que el electrodo negativo es de cadmio.

La solución alcalina de hidróxido de potasio actúa como electrolito. Los electrodos están aislados por un separador y son enrollados en forma espiral, este diseño reduce la resistencia interna por haber una mayor cantidad de electrodo en contacto con el material activo en cada celda. [17]

2.6.3. Batería de sulfuro de sodio.

Conocidas como baterías NAS; han experimentado un desarrollo enorme. A partir de la década de los noventa, se le considera una de las opciones más prometedoras para el almacenamiento de energía a gran escala.

El electrodo positivo consiste en azufre, mientras que el material activo del electrodo negativo corresponde a sodio.

La eficiencia esta tecnología se encuentra en un rango alto, entre 75 % y 100 % con una baja auto descarga 0.01 % al mes y Su vida útil se encuentra alrededor de 3000 ciclos, pudiendo alcanzar entre 10 y 15 años.

Entre las ventajas se tiene que su respuesta es extremadamente rápida, siendo adecuadas para aplicaciones relacionadas con Calidad de Energía; adicionalmente su potencia de pulso es excelente.

por otro lado sus desventajas mas importantes son la descarga que puede producir un aumento de la corrosividad de los polisulfuros aumentando la resistencia interna. [17]

2.6.4. Batería de Litio.

Esta batería esta compuesta por un cátodo de di-sulfuro de titanio y un ánodo de litio-aluminio. la cual es utilizada por su gran comportamiento y sobre todo en proyectos importantes como los carros eléctricos.

Se componen de dos capas de electrodos y una capa de electrolito que varía según el tipo de batería en medio de ambas, separados por una capa de un material poroso de polietileno o polipropileno.

Una de las ventajas de este tipo de baterías es su alta densidad de energía; 75–125 Wh/kg, rápida capacidad de carga, pueden alcanzar el 90 % de su potencia nominal en 200 ms y una alta eficiencia, alrededor del 78 % con más de 3500 ciclos.

Entre las desventajas se encuentra la pequeña vida útil, que se encuentra entre los 2 a 5 años, se descargan por completo, sus electrodos se degradan rápidamente.[17]

Por último hay que tener en cuenta que se realizan constantes investigaciones para mejorar las prestaciones de los acumuladores debido a su importancia en los procesos energéticos, los mas representativos están las baterías de litio que cumplen con una mejora respecto a las tradicionales. Pero por costos no son tan viables como las anteriormente mencionadas; por otro lado se esta trabajando en acumuladores de flujo que funcionalmente son muy prometedores y se esta pensando en su producción a escala comercial; pero tienen la dificultad que sus componentes son costoso y para ello se busca la implementación de polímeros a cambio de estos componentes y al parecer están brindando muy buenos frutos, los cuales representan avances muy buenos energicamente hablando.[15]

2.6.5. Elementos de transporte de energía eléctrica.

En cuanto al transporte de energía se considera alta tensión de energía des de 1kV; pero para las diferentes compañías se les maneja con otras denominaciones como son: instalaciones de transporte, que son las que se caracterizan por llevar una tensión de 220 kV en la mayor distribución y en la menor 66kV; también se encuentran la distribución de primera y segunda categoría y se diferencian por su capacidad de 220 kV la inferior y 30 kV la superior; Por último la distribución de tercera categoría que se caracteriza por tener una tensión entre 30 y 1 kV.

Por tal razón se puede decir que el transporte de la energía maneja un estándar por medio de diferentes tipos de cables dependiendo de la capacidad de los mismos en resistir la tensión eléctrica transportada, normalmente este tipo de cables se definen por medio de calibres o grosor.

Por otro lado se tiene los transformadores que su función es elevar y mantener el potencial de energía durante su transporte debido a las perdidas que hay en el mismo. Se encuentran en las subestaciones ubicadas a lo largo de la red de distribución hasta el consumidor final.[17]

2.7. Fondos de financiación de proyectos.

Un factor importante dentro del desarrollo de cualquier proyecto, es la forma de financiar los costos de investigación e implementación. Los cuales son variables dependiendo de la envergadura de la investigación, la profundidad o lo específico que sea el tema; para la financiación de proyectos de investigación de energías renovables se cuenta con una serie de entidades que apoyan la ejecución de estos, dentro de ellos están:

2.7.1. FAZNI: Fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas no interconectadas.

El fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas no interconectadas (**FAZNI**), el cual tiene como objetivo financiar los planes, programas y proyectos de inversión en infraestructura energética de las zonas no interconectadas determinadas por el ministerio de minas y energía. Teniendo en cuenta que fue creado en los artículos del 81 al 83 de la Ley 633 del 2000, dando una vigencia hasta el 31 de diciembre del 2007; posteriormente prolongándose hasta el 31 de diciembre del 2014 por medio de la Ley 1099 del 2006. Reglamentado por medio del decreto reglamentario 1124 del 2008. Además, por medio de la Ley 855 del 18 de diciembre del 2003 define las localidades que se consideran zonas no interconectadas y establece prioridades de asignación de los recursos, que va de la mano con los lineamientos de políticas establecidos por el consejo nacional de política económica y social en los documentos Conpes 3108 del 2001 y 3453 de 2006. En el caso de necesitar financiamiento para proyectos de producción de energía no convencional en zonas no interconectadas se podrán presentar los proyectos por medio de 3 mecanismos que son: [18]

1-Invitación publica por el ministerio de minas y energía para proyectos de infraestructura energética en ZNI.

2-Invitación publica por el ministerio de minas y energía para implementación parcial o total de esquemas sostenibles de gestión para prestación de servicios de energía en ZNI estipulado en el artículo 65 de la ley 1151 del 2007.

3-Por iniciativa de entidades territoriales del instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas para las zonas no interconectadas (IPSE) o de las entidades prestadoras de servicio de energía eléctrica.[18]

2.7.2. SGR: Sistema General de Regalías.

El Sistema General de Regalías (SGR), es la entidad que determina la distribución, objetivos, fines, administración, ejecución, control, el uso eficiente y la destinación de los ingresos provenientes de la explotación de los recursos naturales no renovables precisando las condiciones de participación de sus beneficiarios. Por tal razón es una de las entidades del estado que están dispuestas en la inversión de recursos económicos para la financiación de proyectos de impacto social y ambiental para el país, de modo tal que genere mayor calidad de vida y desarrollo para el mismo y sus habitantes.[19]

2.7.3. FAER: Fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas rurales interconectadas.

El fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas rurales interconectadas (FAER). El cual tiene como objetivo ampliar la cobertura y satisfacer la demanda de energía en las zonas rurales interconectadas, conforme al desarrollo de los operadores de red avalados por la unidad de planeación minero energética (UPME). Creado por el artículo 105 de la ley 788 de 2002 y reglamentado con el decreto 1122 de 2008, permitiendo a los entes territoriales y las empresas prestadoras de servicios de energía eléctrica en las zonas de influencia que sean los gestores de planes y/o programas de construcción e instalación de nueva infraestructura. En el caso de necesitar financiamiento para proyectos con este fin y dichas características, se podrán presentar bajo las siguientes reglas:[20]

1. La UPME revisara el plan propuesto de modo tal que cumpla con los criterios de eficiencia y expansión, además analizando las tarifas de producción por Kwh.
2. La UPME tiene plazo máximo de 60 días máximo a partir de la radicación de los planes y proyectos para la evaluación y decisión de aval de los mismos.
3. La CREG reconocerá un incremento adicional de distribución con respecto a lo que se tiene en la actualidad, después de haber sido aprobado el plan de expansión, esto con un plazo máximo de 30 días después del aval del proyecto por parte de la UPME.
4. Regular la ejecución, operación y adecuado funcionamiento de los proyectos de expansión aprobados por la UPME, además de la posibilidad de asignar recursos de fondos gubernamentales si es necesario.
5. De no haber interés en la expansión de la red por parte de las empresas prestadoras del servicio público, se hará convocatoria pública para que dicha labor la desempeñen terceros, de modo tal que se supla la necesidad del pueblo.
6. El ministerio otorgara el proyecto al tercero que menos recursos del gobierno necesite para la ejecución del mismo.
7. El ministerio ejecutara una metodología para otorgar los recursos de los fondos teniendo en cuenta el aumento del servicio por cada departamento.
8. Están sujetos a la asignación de los recursos de los fondos del estado, los proyectos que superen la producción.
9. El ministerio podrá determinar en el reglamento de expansión las zonas que requieren cobertura por cuestiones de seguridad, orden público y/o desarrollo social.[20]

2.7.4. FINDETER.

Es un Banco de Desarrollo que ofrece soluciones integrales para construir territorios sostenibles a través de la planeación, estructuración, financiación y asistencia técnica de proyectos de infraestructura, que mejoran la calidad de vida de los colombianos. Cuenta con una estructura organizacional ajustada a nuestras competencias en materia de asistencia técnica, estructuración y financiación de proyectos de buen gobierno promoviendo la responsabilidad social y ambiental del país, por ende, apoya todos los proyectos que impacten de manera positiva en el medio ambiente y a la sociedad en general. [21]

2.7.5. BANCOLDEX.

Es un banco de desarrollo que promueve el crecimiento empresarial y el comercio exterior de Colombia. Contamos con diferentes soluciones, financieras y no financieras, para promover el desarrollo de las empresas. Nuestra gestión se enfoca en fomentar las exportaciones, apoyar la productividad y la competitividad con énfasis en las Mipymes, contribuir a la defensa del medio ambiente y a la mitigación del cambio climático y actuar como instrumento para el restablecimiento del tejido empresarial en zonas de desastre o de deterioro de las condiciones económicas.

Por tal razón cuenta con diferentes líneas de financiamiento de cualquier tipo de proyecto o idea de negocio, que genere rentabilidad y desarrollo para el país. [22]

2.7.6. MinCiencias.

Entidad gubernamental que gestiona la investigación en el país, dentro de sus misiones se encuentra el apoyo de financiamiento de maestrías y doctorados para la generación de nuevo conocimiento, también financiamiento de proyectos de investigación con entidades o institutos de educación superior para generar innovación y una cultura con mentalidad científica; de esta manera lograr el objetivo de su logo “el conocimiento es de todos”. Para acceder a estos financiamientos se hace por medio de convocatorias publicadas por su página virtual con sus requerimientos para poder optar en ella, además que es la entidad que cuantifica la producción intelectual de los investigadores del país por medio de sus resultados en publicaciones indexadas y eventos de alto nivel.[23]

2.7.7. Banco interamericano de desarrollo.

Es una fuente de financiamiento para el desarrollo de América Latina y el Caribe. Ofrece préstamos, donaciones y asistencia técnica; y realiza amplias investigaciones. Dentro de los

temas actuales prioritarios del Banco incluye la sostenibilidad ambiental y la creación de tecnologías que contribuyan con el medio ambiente y la sociedad. [24]

2.7.8. Banco Mundial.

Es una cooperativa integrada por 189 países de todo el mundo. En la práctica es una organización que se ha especializado en la asistencia financiera de los llamados países en desarrollo.

Está conformado por:

Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF). Se encarga de ofrecer préstamos y asistencia financiera a países de ingreso medio.

Asociación Internacional de Fomento (AIF). Se encarga de dar asistencia y préstamos a los países más pobres del planeta.

Corporación Financiera Internacional (CFI). Se centra en el capital privado y tiene como meta ayudar a países en desarrollo movilizándolo capital que se invertirá en proyectos no gubernamentales.

Organismo Multilateral de Garantía de Inversiones (OMGI). Su objetivo es promover la inversión extranjera en países subdesarrollados.

Centro Internacional de Arreglo de Diferencias Relativas a Inversiones (CIADI). Su fin es proporcionar servicios internacionales de conciliación y arbitraje de diferencias para facilitar la inversión extranjera. [25]

2.7.9. CAF: Banco de Desarrollo de América latina.

Conocido como (BANCO DE DESARROLLO DE AMERICA LATINA), conformado por 19 países de los cuales 17 son de América latina y el Caribe, España y Portugal. Y 13 bancos privados de la región. Promueve un modelo de desarrollo sostenible, mediante operaciones de crédito, recursos no reembolsables y apoyo en la estructuración técnica y financiera de proyectos de los sectores público y privado de América Latina. [26]

2.7.10. FENOGE: Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía.

Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE), creado en el artículo 10 la Ley 1715 de 2014 establece que, los recursos que nutran el Fondo podrán ser aportados por la Nación, entidades públicas o privadas, así como por organismos de carácter multilateral e internacional, reglamentado por el Ministerio de Minas y Energía. los

recursos del fondo podrán financiar parcial o totalmente, entre otros programas y proyectos dirigidos al sector residencial de estratos 1, 2 y 3, tanto para la implementación de soluciones e autogeneración a pequeña escala, como para la mejora de eficiencia energética. Los recursos recaudados por el FENOGE, se definen en el artículo 190 de la Ley 1753 de 2015 donde se estableció que, a partir del primero de enero de 2016, de los recursos que recaude el Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales – ASIC correspondientes a un peso con noventa centavos (\$1,90) por kilovatio hora despachado en la Bolsa de Energía Mayorista, cuarenta centavos (\$0,40) serán destinados para financiar el FENOGE, los cuales podrán seguir siendo recaudados con posterioridad a la pérdida de vigencia de la citada disposición, por así establecerlo el artículo 368 de la Ley 1819 de 2016. El FENOGE se reglamenta por medio del Decreto 1543 de 2017, la Resolución 41407 de 2017 expide el Manual Operativo del FENOGE, además encontramos el Manual de Contratación y finalmente, se adopta el Manual para presentar, seleccionar y financiar o ejecutar planes, programas o proyectos necesarios para el cumplimiento de metas o programas nacionales o que se consideren estratégicos por su afectación económica y social, las actividades de fomento, promoción estímulo e incentivo y la asistencia técnica.[27]

2.7.11. PRONE: Programa de Normalización de Redes Eléctricas.

El Programa de Normalización de Redes Eléctricas (PRONE). Fue creado mediante la ley 1117 de 2006, el cual consiste en una financiación por parte del gobierno nacional de planes, programas o proyectos que cumplan con las reglas establecidas en el Decreto 1123 de 2008 y las normas que lo sustituya o complementen. Este programa tendrá el 20 % de financiamiento de los dineros recaudados por el Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas Rurales Interconectadas (FAER), según lo dispuesto en el artículo 1 de la ley 1117 de 2006 y en el Artículo 68 de la ley 1151 de 2007, adicional a los ajustes establecidos en la Resolución CREG-003-2008. Quien recaudara los activos del Sistema de Transmisión Nacional (STN) es el Administrador del Sistema de Transmisión Nacional (STN). Los proyectos a presentarse deben cumplir con los siguientes aspectos [28]:

- 1-El menor costo por usuario
- 2-El mayor número de usuarios de barrios subnormales incluidos en los proyectos de inversión de normalización realizados enteramente por el operador de red.
- 3-Zonas prioritarias son proyectos con mayor posibilidad de aprobarse.[28]

2.7.12. FOES: Fondo de Energía Social.

El Fondo de Energía Social (FOES). Creado mediante el artículo 118 de la Ley 812 de 2003, lo definió como fondo especial del orden nacional, financiado con los recursos provenientes

del ochenta por ciento (80 %) de las rentas de congestión calculadas por el Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales, como producto de las exportaciones de energía eléctrica a los países vecinos dentro de los Convenios de la Comunidad Andina de Naciones.

Hasta cuarenta y seis pesos (\$46) por kilovatio hora del valor de la energía eléctrica destinada al consumo de los usuarios ubicados en zonas de difícil gestión, áreas rurales de menor desarrollo y en zonas subnormales urbanas definidas por el Gobierno Nacional. No se beneficiarán de este Fondo los usuarios no regulados. (Reglamentado inicialmente mediante Decreto 4978 de 2007). Con base en lo anterior se expidió el Decreto 0111 el 20 de enero de 2012, en el cual se definen las áreas especiales, así:[29]

Área Rural de Menor Desarrollo: Es el área perteneciente al sector rural de un municipio o distrito que reúne las siguientes características: (i) presenta un índice superior (54.4), conforme con el indicador de las Necesidades Básicas Insatisfechas publicado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística y (ii) está conectada al circuito de alimentación por medio del cual se le suministra el servicio público de energía eléctrica.

Barrio Subnormal: Es el asentamiento humano ubicado en las cabeceras de municipios o distritos que reúne los siguientes requisitos: (i) que no tenga servicio público domiciliario de energía eléctrica o que éste se obtenga a través de derivaciones del Sistema de Distribución Local o de una Acometida, efectuadas sin aprobación del respectivo Operador de Red ; (ii) que no se trate de zonas donde se deba suspender el servicio público domiciliario de electricidad, de conformidad con el artículo 139.2 de la Ley 142 de 1994, las normas de la Ley 388 de 1997 y en general en aquellas zonas en las que esté prohibido prestar el servicio y, iii) Certificación del Alcalde Municipal o Distrital o de la autoridad competente en la cual conste la clasificación y existencia de los Barrios Subnormales, la cual deberá ser expedida dentro de los quince (15) días siguientes a la fecha de la respectiva solicitud efectuada por el Operador de Red.[29]

Zonas de Difícil Gestión: Conjunto de usuarios ubicados en una misma zona geográfica conectada al Sistema Interconectado Nacional, delimitada eléctricamente, que presenta durante el último año en forma continua, una de las siguientes características:

(i) Cartera vencida mayor a noventa días por parte del cincuenta por ciento (50 %) o más de los usuarios de estratos 1 y 2 pertenecientes a la zona

(ii) Niveles de pérdidas de energía superiores al cuarenta por ciento (40 %) respecto a la energía de entrada al Sistema de Distribución Local que atiende exclusivamente a dicha zona. Para ambos eventos los indicadores serán medidos como el promedio móvil de los últimos 12 meses. Así mismo el Comercializador de Energía Eléctrica, debe demostrar que los resultados de la gestión en cartera y pérdidas han sido negativos por causas no imputables a la propia empresa.[29]

2.7.13. FSSRI: Fondo de Solidaridad para Subsidios y redistribución del ingreso.

El FSSRI, tiene como función administrar y distribuir los recursos asignados del Presupuesto Nacional y del mismo fondo, destinados a cubrir los subsidios del servicio público domiciliario de energía eléctrica a los usuarios de menores ingresos. El FSSRI se rige por los Decretos 847 de 2001 y 201 de 2004, que reglamentan las leyes 142 y 286, donde se establecen los procedimientos de liquidación, cobro, recaudo y manejo de los subsidios y de las contribuciones de solidaridad en materia del servicio de energía eléctrica [30].

2.7.14. FNR: Fondo Nacional de Regalías

Conocida como FONDO NACIONAL DE REGALIAS (FNR), el cual Por medio del Decreto 4923 del 26 de diciembre del 2011, el Decreto 4972 del 30 de diciembre de 2011 y la Ley 1530 de mayo de 2012, se estableció que las actividades a cargo del Ministerio de Minas y Energía correspondientes a viabilización de proyectos a financiar con recursos del Fondo Nacional de Regalías - FNR, se trasladan a los Órganos Colegiados de Administración de Decisión - OCAD, implementados por el Sistema General de Regalías.[31]

2.8. La sustentabilidad.



Figura 2-19.: Desarrollo sustentable.

[1]

2.8.1. Definición

Este término cada vez es más común escucharlo y tiene diferentes interpretaciones por parte de muchas personas ilustres; pero en esencia tienen el mismo objetivo. El cual se trata de generar estrategias para mitigar los cambios negativos en el ámbito ambiental, social y económico. Como se evidencia en la Fig.2-19.

Una de las tantas definiciones de sustentabilidad la dio la CEPAL, 1991,[5] “La sustentabilidad del desarrollo requiere un equilibrio dinámico entre todas las formas de capital o acervos

que participen en el esfuerzo de desarrollo económico y social de los países, de tal modo que la tasa de uso resultante de cada forma de capital no exceda su propia tasa de reproducción, considerando las relaciones de sustitución o complementariedad existentes entre ellas.” Teniendo en cuenta como referencia la definición anteriormente expuesta se puede concluir que debe existir una sinergia entre la oferta y la demanda de los diferentes recursos para no generar impactos negativos en la sociedad, el ambiente o la economía de los diferentes países.[32]

Con el tiempo aparecen las dimensiones de la sustentabilidad, que enmarcan componentes como la libertad política, el bienestar económico, la equidad social y un medio ambiente sano. Que en pocas palabras son los diferentes puntos de vista necesarios para poder tener una vida digna.[33]

Una forma de empezar a darle valor a la sustentabilidad es por medio de indicadores, como son: El producto interno bruto per cápita, la distribución del ingreso, la inversión en capital físico y natural, la dotación del capital natural per cápita; que en pocas palabras es cuantificar que tanto recurso me provee la humanidad y el planeta para así poder repartirlo de la manera más idónea.[34]

Adicional a lo anteriormente mencionado se encuentran los ejes de la sustentabilidad, que de una u otra forma se encuentran implícitos en lo ya hablado; pero es importante brindar la relevancia o aclaración a los mismos y se estructuran sobre tres ejes importantes que son: [35]

2.8.2. Eje ambiental.



Figura 2-20.: Eje ambiental.

[32]

Éste eje sustentable soporta todo el compromiso de la sociedad con el medio ambiente, como se evidencia en la Fig. **2-20** haciendo referencia a la cantidad de emisiones contaminantes,

explotación de los recursos de una manera idónea y no invasiva, contaminación de desechos tóxicos y/o no reciclables, entre muchos aspectos que impactan de manera negativa al medio ambiente; reflejándose en diferentes fenómenos naturales como son el calentamiento global; El cual se genera por la pérdida gradual de la capa de ozono, siendo esta la que cubre o protege el planeta de los rayos solares más intensos y perjudiciales.[1]

Movimiento de las capas tectónicas del planeta que generan terremotos o más conocidos como movimientos telúricos, los cuales producen grandes pérdidas económicas y de vidas humanas. Ciclones que son generados por las diferencias de presión, ocasionando fuertes velocidades de viento que generan pérdidas de inmuebles, vehículos y vidas. Entre muchos más fenómenos que se presentan por no cuidar nuestro planeta y sus recursos.[35]

Ya que no se tiene en cuenta que toda acción generada por el ser humano repercute en el estado del planeta y los recursos que nos ofrece para sobrevivir. [34] [33]

2.8.3. Eje social.



Figura 2-21.: Eje social.

[33]

En este eje es clave resaltar la importancia de reunir la producción del PIB per cápita y el aprovechamiento de los recursos de la nación para repartirlos de una manera equitativa y justa; combatiendo la desigualdad social existente en el mundo entero, que afecta cada vez más a un grupo en especial de habitantes, donde siempre se ven beneficiados los mismos grupos sociales de elite que se enriquecen explotando y el deteriorando el planeta. [35]

Como también es empleando estos recursos obtenidos en diferentes proyectos sociales que impacten de manera positiva en la vida de los habitantes sin perjudicar el medio ambiente. Como se observa en la Fig.2-21.[34]

En conclusión, este eje se encarga de generar una mejor calidad de vida a la humanidad, la cual se construye con más oportunidades, más igualdad, buen servicio de salud, alimento, vestuario, dinero, servicios públicos. Que en general se puede llamar tener una vida digna.[1]
[32]

2.8.4. Eje económico.



Figura 2-22.: Eje económico.
[34]

Éste es el eje más importante para la gran mayoría de empresarios y mandatarios del mundo; ya que el interés por el dinero sobrepasa la importancia de cuidar el planeta. Como se evidencia en la Fig. 2-22. Sin embargo, este eje también tiene un impacto positivo en la generación de proyectos que contribuyan con el mejoramiento climático y de la vida digna que todas las personas merecemos. [32]

Teniendo en cuenta que juega un papel importante el cómo se distribuye la riqueza y para que se implementa; ya que de allí radica el éxito económico del país, su desarrollo físico, académico y cultural. [33]

Después de la revisión de lo anteriormente expuesto se puede ver la importancia de la sustentabilidad y de sus ejes en el desarrollo sustentable de un país; donde impacta muchos puntos de vista que van encaminados a un avance firme sin perder lo que se ha logrado hasta el momento. [35]

Por tal razón se crean los tres escenarios de la tesis desde este punto de vista y se evidencian por medio de la recolección de la percepción de una muestra de personas acerca de los tres ejes de la sustentabilidad realizado en una encuesta. Por otro lado, dándole la importancia o el peso del componente ambiental y por ultimo al ámbito económico. Para así poder generar una visión más amplia de la situación del país, contemplando este criterio tan importante en el desarrollo sustentable de una nación. [1]

3. Metodología para la Aplicación del Método Multicriterio

En este capítulo se encuentra plasmada la metodología que se llevó a cabo en el desarrollo del proyecto. Por tal razón, es importante comprender cada uno de los procedimientos que se realizaron con los meta-datos de los mapas de información y las encuestas realizadas en la población ECCI. Recuérdese que el fin es generar mapas de emplazamiento idóneo para la microgeneración de energía eólica de una manera sustentable [36].

3.1. Revisión de la disponibilidad del recurso eólico

Básicamente es revisar el estado del arte respecto a este tipo de energía renovable, de este modo tener una visión de cuál es el comportamiento de la energía en el mundo y en el país; adicional a ello, comprender los diferentes planos de información eólica con los que cuenta el país y poder utilizarlos en la simulación, imprescindibles para el tratamiento estadístico de los datos [7], esto se presentó en el capítulo anterior.

3.2. Planos de información.

Los planos de información, básicamente es información geográfica que son obtenidos por medio de diferentes entidades gubernamentales para el análisis del comportamiento de la población, la economía, la educación y el clima; por ejemplo: El DANE, el IDEAM, entre otras entidades presentan esta información en forma de mapas para monitorizar comportamientos ó como en este caso, para realizar procesos de investigación, simulación etc.; Son además de acceso público. Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, se utilizaron los siguientes planos de información:[7]

1. Velocidad del viento a 50m periodo 2000-2010.
2. Cobertura de energía 2012.
3. Zonas no interconectadas 2015.
4. Desarrollo municipal 2015.

5. Parques naturales nacionales.

3.2.1. Mapa de velocidad del viento a 50m periodo 2000-2010.

En la siguiente Fig.3-1 se presenta el mapa de la velocidad del viento en Colombia a 50 m de altura. En la Tabla(3-1) se muestran los metadatos más importantes del respectivo mapa:

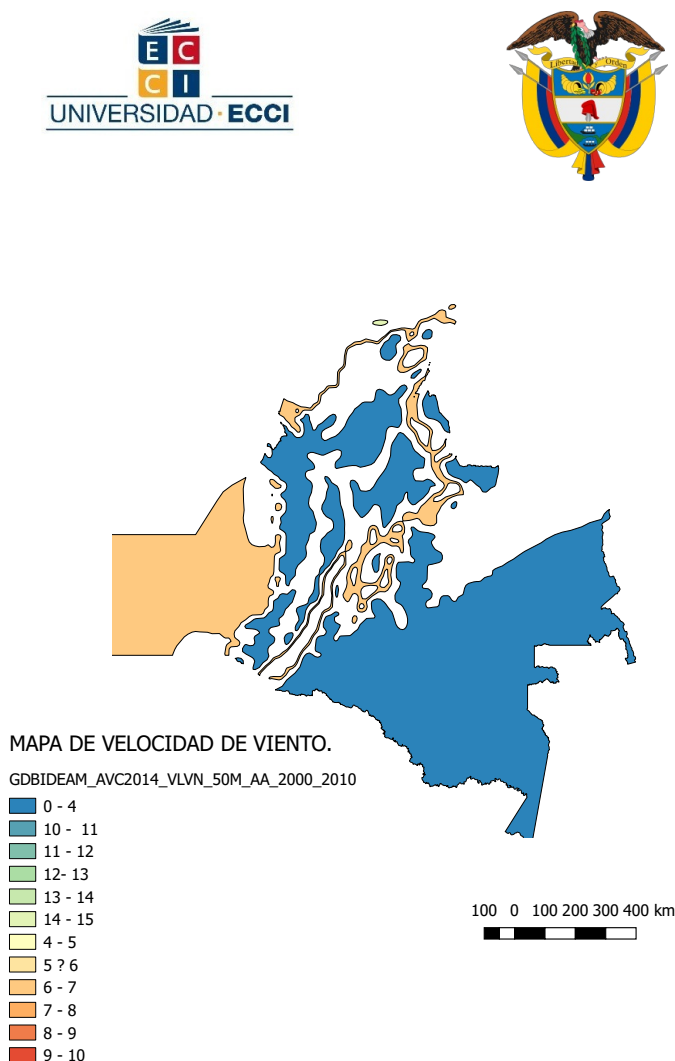


Figura 3-1.: Mapa de velocidad de viento en los municipios de Colombia.

Los mapas de velocidad de viento de Colombia publicados por la UPME, brindan la información por medio de escala de colores, referenciando el rango de velocidades en específico con cada uno de los colores en el mapa del territorio colombiano, además de ello nos brin-

da el desglose de estudio mensual, de modo tal que los comportamientos de los vientos en Colombia se pueden contemplar mejor por medio de esta herramienta.

Teniendo en cuenta que para la creación de estos mapas se necesita del tratamiento de los datos de las lecturas registradas por las centrales de información, las cuales obtienen datos 1,4 o 15 minutos dependiendo del equipo utilizado en cada central, de este modo se realiza el reporte de la velocidad del viento promedio, dirección, radiación, humedad y demás datos específicos a la base central para el respectivo registro para la generación de los respectivos mapas de información.[7]

Para la creación del mapa de viento de Colombia a 50m; se utiliza una metodología de recolección de datos de velocidad de viento por medio de estaciones que llevan un control de su comportamiento con anemómetros; los cuales indican la velocidad del viento momento a momento con su respectiva dirección y sentido.

Cabe resaltar que la importancia de este mapa radica en que la medición del recurso utilizado es la base de decisión en la implementación o no de un proyecto eólico, ya que si no se cuenta con la cantidad mínima de velocidad del recurso no es viable la implementación de esta tecnología.

Adicional a ello se cuenta con 3 atributos importantes, que se explican a continuación y se resumen en la Tabla **3-1** [7]:

Tabla 3-1.: Metadatos plano de energía eólica.[31]

	GRIDCODE	RANGO	RULEID
1	5.000000000000...	7-8	5
2	5.000000000000...	7-8	5
3	3.000000000000...	5-6	3
4	6.000000000000...	8-9	6
5	1.000000000000...	0-4	1
6	4.000000000000...	6-7	4
7	5.000000000000...	7-8	5

Donde:

- **GRIDCODE:** Es el código de cuadrícula, escala de ubicación respecto al mapa.
- **RANGO:** Es el rango de la velocidad en ese punto respectivamente.
- **RULEID:** Es el valor entero del punto de valoración específico de la ubicación brindada.

3.2.2. Mapa de cobertura de energía 2012.

En la siguiente Fig.3-2 se evidencia el mapa de la información mencionada en la Tabla.(3-2):

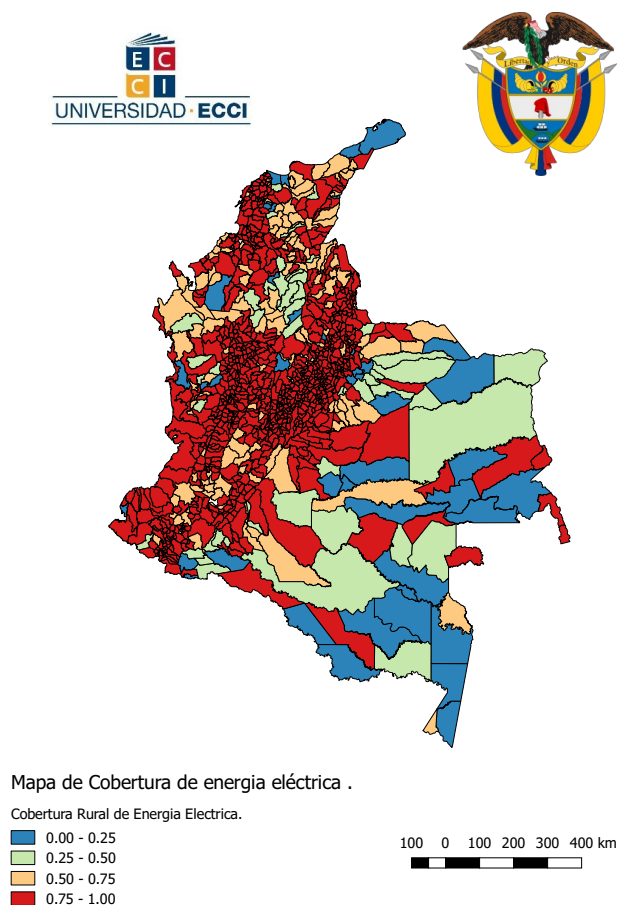


Figura 3-2.: Mapa de cobertura energética en los municipios de Colombia.

El mapa de cobertura rural de energía fue realizado con la información brindada por los operadores de red contratados para el estudio, el instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas (IPSE), validación de la información por entes territoriales y el departamento administrativo nacional de estadística (DANE). De estos insumos se realizó el cálculo respectivo por medio de la formula (3-1).[7]

Ya que la importancia de este mapa radica en la cantidad de personas que cuentan o no con energía eléctrica; de este modo tener un panorama de la cantidad de personas que impactaría un proyecto energético en cada parte del territorio colombiano.

$$IC_{ij} = \frac{U_{ij}}{V_{ij}} \times 100 \% \quad (3-1)$$

Donde:

i :Periodo de análisis

j :Municipio, departamento, región.

IC_{ij} :Índice de cantidad de viviendas para el año i en el municipio j .

U_{ij} :cantidad de usuarios para el año i en el municipio j .

V_{ij} :Cantidad de viviendas para el año i en el municipio j .

Esto se puede evidenciar en la muestra generada en la siguiente Tabla de atributos (Ver Tabla **3-2**):

Tabla 3-2.: Metadatos plano de cobertura rural de energía.[27]

ID_ESPACIAL	AREA_OFICIAL	NOMBRE_DEPARTAMENTO	NOMBRE_MUNICIPIO	valor	Rango
91530	839.400.000.000	AMAZONAS	PUERTO ALEGR (Cor. Departamental)	3.27	20,1-50
91263	1.107.400.000.000	AMAZONAS	EL ENCANTO (Cor. Departamental)	7.41	20,1-50
91536	1.335.000.000.000	AMAZONAS	PUERTO ARICA (Cor. Departamental)	41.86	20,1-50
91798	877.500.000.000	AMAZONAS	TARAPAC' (Cor. Departamental)	6.20	20,1-50
91001	582.900.000.000	AMAZONAS	LETICIA	21.05	20,1-50
91540	147.500.000.000	AMAZONAS	PUERTO NARIÑO	69.64	20,1-50
91460	1.656.400.000.000	AMAZONAS	MIRITPARAN' (Campoamor) (Cor. Departamental)	17.15	20,1-50

Para ello también se tienen en cuenta otros aspectos como son:

- ID ESPACIAL: Este es un numero codificado para la identificación de un espacio geográfico en específico en todo el territorio colombiano.
- AREA OFICIAL: Hace referencia al área total del territorio que se está revisando.
- NOMBRE DEL DEPARTAMENTO: Hace referencia al departamento donde se encuentra la medición.
- NOMBRE DEL MUNICIPIO: Hace referencia al nombre del municipio donde se hizo la medición.
- VALOR: Hace referencia al resultado de la operación de la fórmula de índice de cobertura.
- RANGO: Es la ubicación entre datos específicos para generar un contexto de datos similares.

3.2.3. Mapa de zonas no interconectadas 2015.

Este mapa hace referencia a los lugares del territorio colombiano donde no hay conexión de energía eléctrica, representada por el Sistema de Transmisión Nacional (STN).

En la siguiente Fig.3-3 se evidencia el mapa de la información mencionada en la Tabla.(3-3):

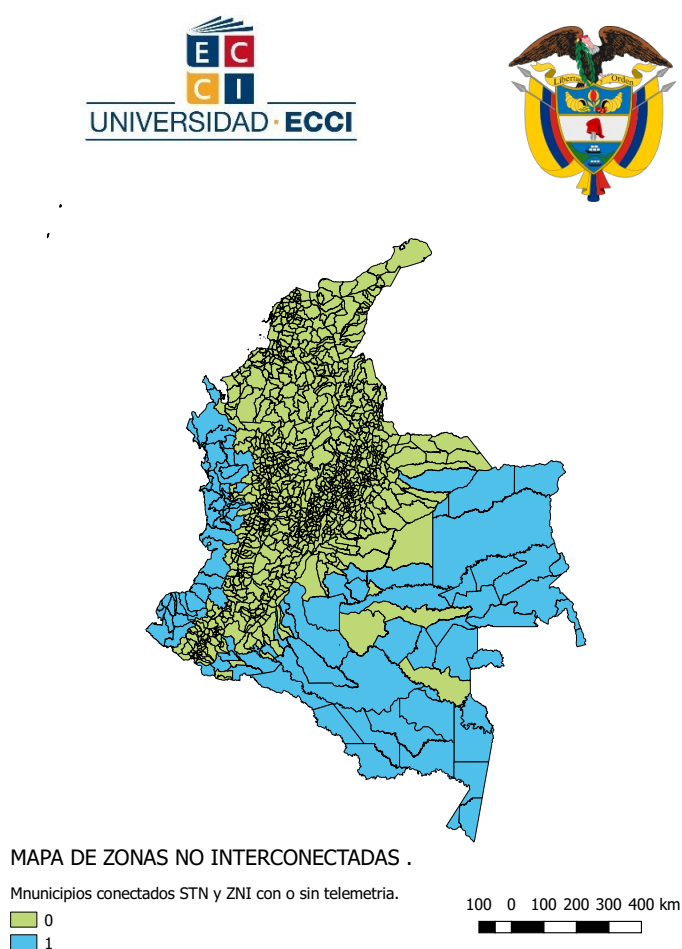


Figura 3-3.: Mapa de cobertura energética en los municipios de Colombia.

Por esta razón la importancia de los datos del mapa, ya que ubica datos claros de donde es necesario implementar un proyecto de energía para generar una conexión energética a estos lugares beneficiando a la población residente; las cuales se consideran como las más necesitadas de este recurso energético.

Adicionalmente este tipo de características impactan de manera directa en el desarrollo económico, social y cultural de la región ya que al haber cobertura energética hay más posibilidades de que su desarrollo sea mejor.

Uno de los atributos más relevantes de este mapa es la existencia o no de telemetría; ya que la telemetría es el dato del territorio en cuanto a su estado energético. En pocas palabras si esta o no conectado a red de energía eléctrica. El cual se contempla como un factor importante dentro del análisis a realizar.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito en la Tabla **3-3**:^[37] se evidencia la información más relevante:

- **ID DEPARTAMENTAL**: Este número hace referencia a la codificación asignada por el DANE para estandarizar e identificar regiones enteras para la realización de proyectos.
- **ID MUNICIPAL**: Este número hace referencia a la codificación asignada por el DANE para ubicar cada uno de los municipios del territorio colombiano.
- **DATOS DE ENERGÍA**: En este espacio se encuentra la información que corrobora si hay o no telemetría en dicho municipio.

Tabla 3-3.: Metadatos plano de zonas no interconectadas.^[29]

DEPARTAMENTO	ID_MUNICIPIO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	FUENTE	DATOS_ENERGÍA	ID_CATEGORÍA
CAUCA	19318	GUAPI	QUIROGA	DANE	NO TELEMETRIA	Corregimiento
CAUCA	19318	GUAPI	QUIROGA LADO 2	IPSE	NO TELEMETRIA	Localidad Menor
CAUCA	19318	GUAPI	ROBLES	IPSE	NO TELEMETRIA	Localidad Menor
CAUCA	19318	GUAPI	ROSARIO	DANE	NO TELEMETRIA	Corregimiento
CAUCA	19318	GUAPI	SAN AGUSTIN	DANE	NO TELEMETRIA	Corregimiento
CAUCA	19318	GUAPI	SAN ANTONIO DE GUAJUI	DANE	TELEMETRIA	Corregimiento
CAUCA	19318	GUAPI	SAN JOSE DE GUAPI	DANE	NO TELEMETRIA	Corregimiento

3.2.4. Mapa de desarrollo humano municipal.

Para la realización de este mapa se tiene en cuenta la información recolectada por el departamento nacional de planeación (DNP), de la cual mide el impacto social respecto a la evolución del departamento; para ello maneja una serie de criterios de decisión por medio de indicadores, de los cuales se establecen la viabilidad e impacto de proyectos. Para este caso la evaluación se caracteriza por tres indicadores que exponen si el desarrollo generado es:

En la siguiente Fig.3-4 se evidencia el mapa de la información mencionada en la Tabla.(3-4):

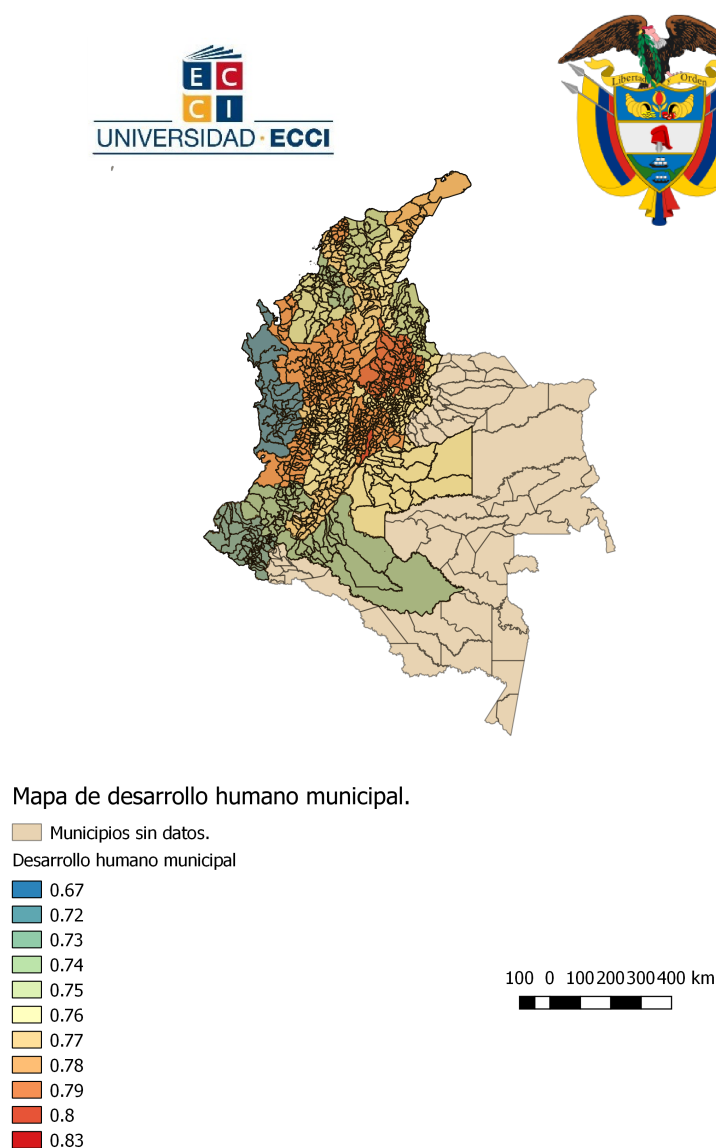


Figura 3-4.: Mapa de desarrollo humano en los municipios de Colombia.

- incipiente, se asocia con un 1,
- si es intermedio se asocia con un 2 ó
- si es robusto se asocia a un 3.

Con estas valoraciones se puede separar en 3 grupos el desarrollo de las personas que habitan cada parte del territorio de Colombia, con aras de mejorar estas valoraciones con la implementación de proyectos sociales para mejorar este eje sustentable.

De allí nace la caracterización principal de este mapa.Fig.**3-4** [37]

- ID ESPACIAL: Este es un numero codificado para la identificación de un espacio geográfico en específico en todo el territorio colombiano.
- AREA OFICIAL: Hace referencia al área total del territorio que se está revisando.
- NOMBRE DEL DEPARTAMENTO: Hace alusión a la discriminación de qué tipo de territorio se está trabajando dependiendo de la organización territorial discriminada por el gobierno.
- CÓDIGO DEL DEPARTAMENTO: Este número hace referencia a la codificación asignada por el DANE para estandarizar e identificar regiones enteras para la realización de proyectos.
- VALOR: Hace referencia al resultado de la operación de la fórmula de índice de cobertura.
- RANGO: Es la ubicación entre datos específicos para generar un contexto de datos similares.

De igual manera se puede observar el compilado de información en la Tabla.(**3-4**) de criterios o atributos así:

Tabla 3-4.: Metadatos plano de desarrollo Municipal

ID_ESPACIAL	AREA_OFICIAL	NOMBRE_DEPARTAMENTO	Año	valor	rango
11	1605.00	BOGOTA 2015	3.00	3	Robusto
13	26383.00	BOLIVAR	2015	2	Intermedio
15	23189.00	BOYACA 2015	2.00	2	Intermedio
17	7888.00	CALDAS	2015	2	Intermedio
18	88965.00	CAQUETA 2015	1.00	1	incipiente
19	29308.00	CAUCA	2015	2	Intermedio
20	22905.00	CESAR	2015	2	Intermedio

3.2.5. Mapa de parques naturales nacionales.

En la siguiente Fig.3-6 se evidencia el mapa de la información mencionada en la Tabla.(3-5):

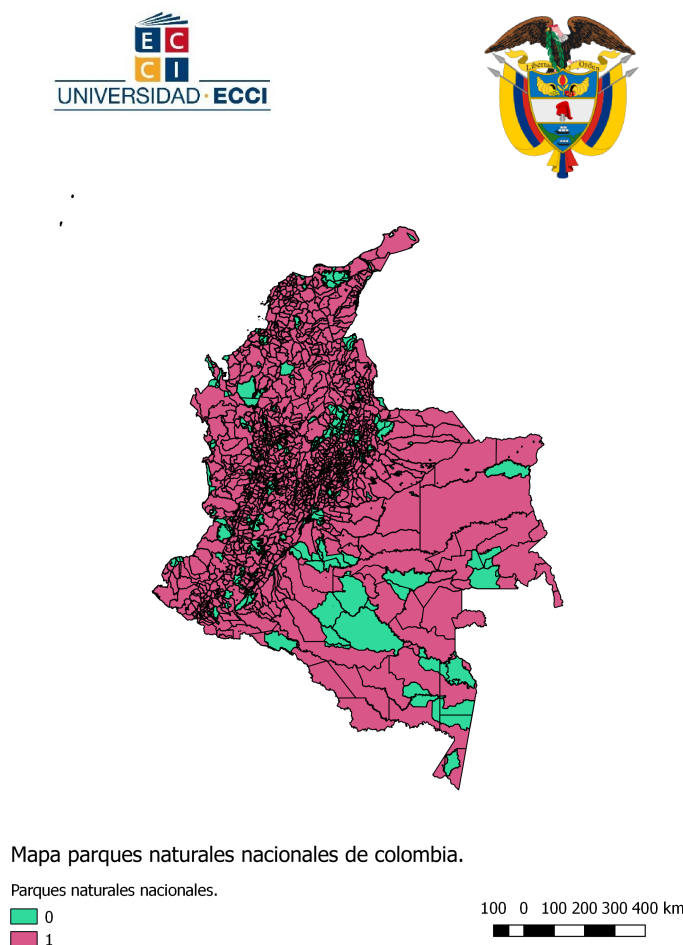


Figura 3-5.: Mapa de parques naturales nacionales en Colombia.

Para la creación de este mapa se tiene como información importante la localización de las reservas naturales contempladas por el sistema nacional de áreas protegidas (SINAP), de modo tal que se tengan presentes como áreas restringidas para implementación de proyectos de cualquier índole.

Teniendo en cuenta la entidad parques naturales de Colombia; que fue creada a nivel nacional sin personería jurídica y con autonomía administrativa y financiera según los términos del

artículo 67 de la Ley 489 de 1998.

Siendo esta entidad la encargada de la administración y manejo del sistema de parques nacionales naturales y el sistema nacional de áreas protegidas; teniendo una reestructuración en el 2011 mediante el Decreto 3572 de 2011 y se creó como una unidad administrativa especial.

Con lo anteriormente expuesto este mapa es fundamental para parametrizar este tipo de áreas protegidas como no aptas para su utilización.

De toda la información depositada por esta entidad es relevante para la investigación los siguientes atributos consignados en la Tabla 3-5 [38]:

Tabla 3-5.: Metadatos plano de parques nacionales naturales.[30]

NOMBRE	ID_PNN	CATEGORÍA	centroid_x	centroid_y	hectareas	perimetro_
Montecristo	2.070.032	Reserva Natural de la Sociedad Civil	-7,635E+32	1,85048E+31	4,E+31	0.93682
Isla de la Corota	2.030.006	Santuario de Fauna y Flora	-7,7149E+32	1,12967E+31	4,E+31	1,61705E+31
Yaigoje Apaporis	2.020.011	Parque Nacional Natural	-7,0259E+32	-0.6562860400000000149489665091096	4,E+31	9,2359E+33
Puinawai	2.040.002	Reserva Natural	-6,9175E+32	2,28925E+31	4,E+31	7,82566E+33
Cerros de San Nicolas	20.100.003	Distritos Regionales de Manejo Integrado	-7,5341E+32	6,04986E+31	4,E+31	1,27666E+33
Del Humedal San Silvestre	27.100.001	Distritos Regionales de Manejo Integrado	-7,368E+32	7,03675E+31	4,E+31	1,67218E+33
Yurupari Malpelo	1.130.002	Distritos Nacionales de Manejo Integrado	-8,2583E+32	3,86208E+31	4,E+31	7,17546E+33

Donde:

- NOMBRE: Hace referencia al nombre que se le dio al parque natural.
- CATEGORÍA: Se caracteriza según las características que presente el territorio.
- TERRITORIO: Es la ubicación donde se encuentra el parque o reserva.
- HECTÁREAS: Es el área que ocupa el parque a trabajar.
- CENTROIDE EN X Y CENTROIDE EN Y: Es la referenciación por coordenadas

sobre el territorio nacional, de acuerdo con la proyección de Mercator.

- PERÍMETRO: Es la relación con respecto al área que ocupa el parque.

3.2.6. Mapa de la división política municipal.

Este mapa es importante como base del resto de planos de información anteriormente expuestos, de modo tal que la información se pudiera focalizar por municipio y generara el análisis respectivo.

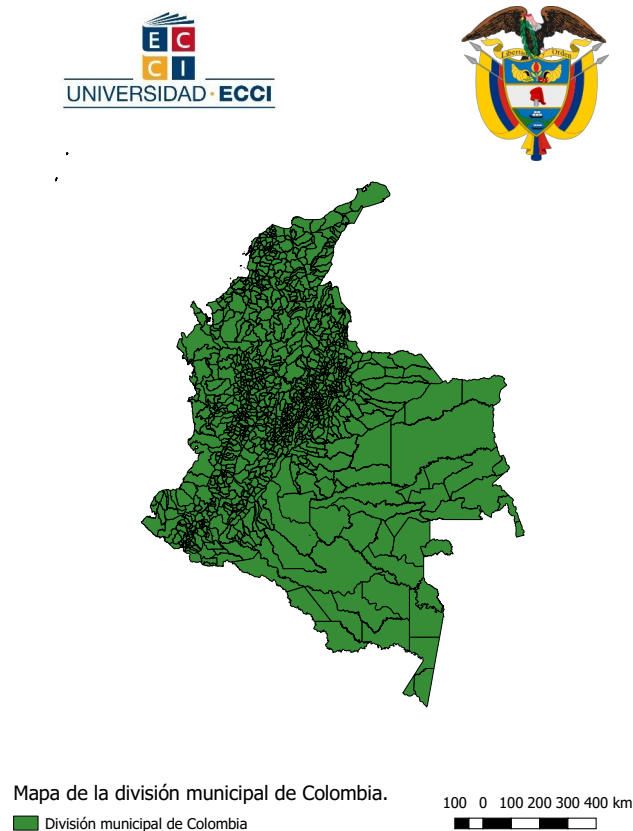


Figura 3-6.: Mapa de parques naturales nacionales en Colombia.

En pocas palabras este mapa de división política es importante para poder distinguir los límites municipales y la información que corresponde a cada uno de ellos y ser tratada por el software de QGIS.


3.3. Escenarios planteados.

Es importante tener en cuenta los escenarios que se plantearon en el desarrollo de la tesis y de este modo entender cual fue su origen y por que razón se generaron estos escenarios; para ello se van a explicar cada uno de ellos.[35]

3.3.1. Escenario de encuestas realizadas a la Comunidad ECCL

Este escenario esta soportado por la aplicación de la metodología AHP que solicita la intervención o punto de vista de una muestra de la población al respecto de los diferentes criterios de decisión.[39] Como se evidencia en la Fig.3-7. y el resultado de esta encuesta arroja unos pesos relativos que se evidencian más adelante en la Tabla 3-7

Con estos resultados aplicar la respectiva metodología con los datos de obtenidos en los planos de información. Teniendo en cuenta que la metodología adoptada en diferentes investigaciones se centran en la sugerencia hecha por el señor Saaty que consiste en tomar una muestra 5 veces mayor a la cantidad de planos utilizados. [40]



UNIVERSIDAD
ECCL

UNIVERSIDAD ECCL.
MAESTRIA EN INGENIERIA.
ENCUESTA
EMPLAZAMIENTO DE MICROGENERACION DE ENERGIA EOLICA EN COLOMBIA.

ESTUDIANTE: _____ CODIGO: _____ PROGRAMA: _____ FECHA: _____

FICHA TECNICA.

Esta encuesta esta diseñada para establecer el nivel de importancia de los criterios utilizados en la investigación de la microgeneración de energía eléctrica en Colombia; para ello tenga en cuenta lo siguiente:

1- **Recurso eólico:** Es la velocidad generada por el viento para la generación de energía eléctrica con el aprovechamiento de su energía.

Zonas no interconectadas (ZNI): zonas de Colombia que no cuentan con conexión a la red eléctrica.

Desarrollo Municipal: Es la capacidad que tiene el municipio para gestionar proyectos de desarrollo.

Cobertura energética: Hace referencia al porcentaje de personas que tienen conexión de energía eléctrica respecto a la cantidad de habitantes del municipio.

Parques nacionales naturales: Tiene en cuenta si hay o no parques en el territorio de estudio.

2- Utilice la siguiente tabla de valores, teniendo en cuenta los siguientes rangos:

Menos importante				Igual	Mas importante			
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9

3- **Metodología:** Dele valor a la importancia que tiene el factor de la fila vs al factor de la columna teniendo en cuenta los pesos anteriormente expuestos en la tabla.

	ENERGIA EOLICA	ZONA NO INTERCONECTADA	DESARROLLO MUNICIPAL	COBERTURA ENERGETICA	PARQUES NACIONALES NATURALES
ENERGIA EOLICA					
ZONA NO INTERCONECTADA					
DESARROLLO MUNICIPAL					
COBERTURA ENERGETICA					
PARQUES NACIONALES NATURALES					

Nota: Tenga en cuenta que se debe dar valor a la parte superior de la tabla ya que la parte inferior es el valor inverso respectivamente.

Figura 3-7.: Encuesta realizada a la muestra de Comunidad ECCL.

Adicional a ello hay que tener en cuenta que la metodología de aplicación de las encuestas hechas a la población de la universidad ECCI; se hizo con estudiantes de tecnología en mecánica automotriz de 2 a 4 semestre y se les explicó previamente en que consistía la encuesta, como se debía valorar, para que se estaba realizando y la importancia de contestar a conciencia y ser parte de esta investigación.[40]

3.3.2. Escenario de Desarrollo Sustentable

En este escenario se tiene como referente la definición dada por la CEPAL 1991, “la sustentabilidad del desarrollo requiere un equilibrio dinámico entre todas las formas de capital o acervos que participan en el esfuerzo del desarrollo económico y social de los países, de tal modo que la tasa de uso resultante de cada forma de capital no exceda su propia tasa de reproducción, considerando las relaciones de sustitución o complementariedad existentes entre ellas” [5]

Por tal razón su enfoque se da a los tres ejes de la sustentabilidad; pero con un mayor peso en el eje ambiental, debido a la importancia de cuidar nuestro medio ambiente en los momentos que estamos viviendo. Como se evidencia en la Tabla **3-8** los pesos relativos para este escenario. En este caso, la opinión de la Comunidad se cambia por la opinión de profesores expertos en Energías Renovables y Desarrollo Sustentable.

Después de su valoración se aplica el cálculo del Rank-sum y así se obtienen dichos pesos finales.[35]

3.3.3. Escenario de liberalismo Económico

Teniendo en cuenta la definición de la CEPAL que se dio en el escenario anterior, se evidencia que éste factor económico pasa a un segundo plano respecto al enfoque medioambiental. De este modo se busca observar cual es el impacto que se genera al contemplar este tipo de escenarios o propuestas. Sabiendo que el escenario se dirige a realizar la explotación de los recursos sin medir consecuencias y solo enfocándose en el lucro económico. [5] Para ello se tiene como referencia los pesos relativos de la Tabla **3-9**. En este caso, la opinión de la Comunidad se cambia por la opinión de profesores expertos en Energías Renovables y Desarrollo Sustentable.

Para la ejecución de su cálculo se utiliza la metodología Rank-sum y así se obtienen dichos pesos finales.[35]

3.4. Métodos de estadística multivariada.

Para el procesamiento de los metadatos necesarios para obtener los planos de emplazamiento idóneo para microgeneración eólica en Colombia se debe contar con la información estadística de cada uno de los criterios a evaluar, entre ellos están: la cantidad del recurso, la cobertura energética, las zonas no interconectadas, los parques nacionales naturales y el índice de desarrollo humano. Después de la obtención de la información a normalizar cada uno de los criterios de manera creciente o decreciente según el caso; identificar el dato en común de cada uno de los criterios para poder enlazarlos y crear los nuevos mapas. Por último aplicar las metodologías adoptadas para hallar la idoneidad de los municipios según sus características.[36]

El Ranksum Teniendo en cuenta las técnicas de análisis multivariado primero se debe generar la importancia relativa existente entre los criterios que se tiene en cada plano de información; haciendo la evaluación de cada uno de ellos y definiendo los pesos de cada factor. Por tanto se debe realizar como primer paso la normalización de los criterios y así obtener su peso en una nueva escala de 1 ó 0.[41]

La normalización se puede hacer de dos maneras, la primera es de manera creciente ecuación (3-2) , dado que toma el 1 como el valor de más importancia y la segunda es de manera decreciente ecuación (3-3), dado que toma el 1 como el valor de menos importancia. [39]

Para poder hacer la aplicación de los métodos estadísticos se debe realizar la normalización de los datos recolectados como se explico anteriormente; teniendo en cuenta que se hace tanto para la (Encuesta) como para los metadatos de cada plano de información.[41]

El análisis anteriormente expuesto se realiza por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\mu_i = \left(\frac{x_i - x_{max}}{x_{max} - x_{min}} \right) \quad (3-2)$$

Donde:

- μ : Normalización.
- x_i : Valor a ser normalizado.
- x_{min} : Valor mínimo de los criterios.
- x_{max} : Valor máximo de los criterios.

La ecuación de normalización de criterio de forma descendente se realiza con la ecuación (3-3):

$$\mu_i = \left(\frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \right) \quad (3-3)$$

Donde:

- μ : Normalización.
- x_i : Valor a ser normalizado.
- x_{min} : Valor mínimo de los criterios.
- x_{max} : Valor máximo de los criterios.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se ejecuta como se refleja en la Tabla **3-6**:

Tabla 3-6.: Criterio de normalización. [27]

Criterio	Escala normalizada	Analogía	Tipo de normalización
Velocidad del viento	1	1 alta y 0 baja velocidad	Creciente
	0		
Parques nacionales naturales	1	1 Sin PNN y 0 Con PNN	Decreciente
	0		
Desarrollo humano	1	1 alto % y 0 bajo %	Creciente
	0		
Cobertura de energía	1	1 no y 0 Si tiene cobertura	Decreciente
	0		
Zonas no interconectadas	1	1 es ZNI y 0 no es ZNI	Decreciente
	0		

Teniendo en cuenta que para este análisis se van a manejar 3 escenarios que son:

- 1- Escenario de encuestas a la comunidad ECCI.
- 2- Escenario de desarrollo sustentable.
- 3- Escenario de liberalismo económico.

Después de hacer el proceso de normalización de los datos obtenidos se ejecuta el método Rank-sum el cual permite dar un orden a los criterios; dando una jerarquía a cada plano de información dependiendo del escenario planteado; teniendo en cuenta que la valoración se da por unidades desde 1 hasta 5 siendo el numero 1 el más importante y el 5 el menos importante.[42]

Para poder dar la jerarquía se debe utilizar la ecuación (3-4), y teniendo que la suma de los pesos normalizados debe ser igual a 1.

$$W_j = \frac{n - r_j + 1}{\sum_k (n - r_k + 1)} \quad (3-4)$$

Donde:

- W_j : Peso normalizado para el atributo j.
- r_j : Posición de rango del atributo.
- n : Número de atributos.

Después de utilizar la ecuación 3-4 obtenemos las Tablas de cada escenario planteado, quedando así: Tabla **3-7** para el escenario del resultado de las encuestas realizadas a la población de la Universidad ECCI, Tabla **3-8** para el escenario del desarrollo sustentable y la tabla **3-9** para el escenario liberalismo económico.[43]

	Categoría	Peso
Velocidad de viento	3	0.2016
Zona no interconectada	1	0.2561
Desarrollo Dept.	5	0.1638
Cobertura energética	4	0.1639
Parques Nacionales	2	0.2143
Total		1

Tabla 3-7.: Escenario de encuestas.

	Categoría	Peso
Velocidad de viento	2	0.267
Zona no interconectada	3	0.200
Desarrollo Dept.	5	0.067
Cobertura energética	4	0.133
Parques Nacionales	1	0.333
Total		1

Tabla 3-8.: Escenario desarrollo sustentable

	Categoría	Peso
Velocidad de viento	1	0.333
Zona no interconectada	2	0.267
Desarrollo Dept.	3	0.200
Cobertura energética	4	0.133
Parques Nacionales	5	0.067
Total		1

Tabla 3-9.: Escenario liberalismo económico

La metodología AHP Es un proceso de análisis jerárquico, planteado por el señor (Saaty),[40] el cual se basa en la evaluación de varios criterios a tener en cuenta jerarquizando de manera coherente el objetivo de la investigación. [44]

De esta manera poder tomar decisiones respecto a diferentes escenarios probables; donde juega un papel importante la prioridad o el peso de cada uno de los criterios debido a su impacto en el análisis realizado.[36]

Para la ejecución de este método es importante realizar una encuesta teniendo en cuenta la posición de la sociedad con una valoración relativa, utilizando la Tabla **3-10** y la Tabla **3-11**. para dar su punto de vista que genera 25 matrices de $n \times n$ [39] que con ayuda de la Ecuación (3-5), da como resultado una sola matriz global y de la Ecuación (3-6) calcular la razón entre el valor de la matriz global y la adición de la columna consolidada para obtener una matriz normalizada. [41]

Menos importante				Igual	Más importante			
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Absoluta	Muy grande	Grande	Pequeña	Igual	Pequeña	Grande	Muy grande	Absoluta

Tabla 3-10.: Escala de importancia relativa
[40]

Con estos datos se elaboró la comparación de la tabla de decisión uno a uno ó criterio a criterio; de la cual aparece la siguiente Tabla **3-11**:

Tabla 3-11.: Valoración de encuestas [27]

	Energía Eólica	ZNI	Desarrollo D/tal	Cobertura energética	PNN
Energía Eólica					
ZNI					
Desarrollo D/tal					
Cobertura energética					
PNN					

Algo importante para tener en cuenta la valoración de esta Tabla **3-11** es la comparación o incidencia del criterio que aparece en la fila (Vs) el de la columna y los espacios coloreados significan que es el mismo criterio y su incidencia es igual o directa.[42]

Las preguntas de evaluación se deben hacer así: ¿ Que tanto influye el criterio de la fila (Vs) el criterio de la columna?.

Adicional a esto hay que tener en cuenta que el método determina que la muestra de encuestas debe ser 5 veces mayor al numero de criterios a evaluar; que en nuestro caso son 5 criterios y el numero de encuestas totales deben ser 25. [39]

$$r = \exp \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \ln a_{ij} \right] = \left(\prod_{k=1}^{k=n} \right)^{1/n} \quad (3-5)$$

Donde:

r: Es el valor consolidado.

N: Total de tomadores de decisión.

a_{ij} : Escala adoptada por tomador de decisión.

$$p = \frac{r}{\sum_{i=1}^N r} \quad (3-6)$$

Donde:

p: Es el valor normalizado.

r: Es el valor consolidado.

Luego de normalizar la matriz global se procede a identificar el peso relativo que tiene cada uno de los criterios de los planos de información, este cálculo se hace con la ecuación 3-7, llamada vector prioridad o vector Eigen.[39]

$$W = \frac{\Sigma p}{n} \quad (3-7)$$

Donde:

w: Es el vector de prioridad ó vector EIGEN.

p: Es el valor normalizado.

n: Es total de criterios.

Para calcular el vector principal de Eigen se debe utilizar la ecuación (3-8), en la cual se realiza la suma de los productos del vector prioridad con la suma de las columnas de la matriz consolidada.[42]

$$\lambda_{max} = \Sigma(W * \Sigma r) \quad (3-8)$$

Donde:

λ_{max} : Es el valor principal del vector EIGEN.

W: Es el vector prioridad ó vector EIGEN.

r: Es el valor consolidado.

El siguiente paso es la verificación del índice de consistencia de las opiniones de las personas encuestadas, según la ecuación (3-9).[36]

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3-9)$$

Donde:

CI: Es el índice de consistencia

λ_{max} : Es el valor principal del vector EIGEN.

n: Es total de criterios.

Teniendo en cuenta el método [40] propone el uso de la ecuación (3-10) para calcular la tasa de consistencia verificando la adecuación del valor de consistencia y el índice aleatorio R_I ; el cual se toma de acuerdo a la dimensión de la matriz, según la tabla **3-12**, siendo una condición necesaria para obtener el resultado real, tomando como nombre tasa de consistencia C_R y que debe estar por debajo del 10 %. [39]

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3-10)$$

Donde:

CR: Es la tasa de consistencia.

CI: Es el índice de consistencia.

RI: Es el índice de consistencia aleatoria.

Tabla 3-12.: Tasa de consistencia. [27]

Dimensión de la Matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,52	1,54	1,56	1,58	1,59

3.5. Aplicación de la Combinación Lineal Ponderada WLC.

Al terminar la aplicación la metodología AHP,[44] se aplica la metodología de decisión de WLC o también conocida como la combinación lineal ponderada. Esta tiene como fin, equilibrar cada uno de los criterios tomados y normalizados anteriormente; para ello, se combinan los criterios a través del promedio ponderado agregando los valores obtenidos de la multiplicación del criterio del factor normalizado, multiplicado por su respectivo peso de importancia relativa y el resultado a su vez, se multiplica por el criterio de exclusión, como se muestra en la ecuación (3-11). [39]

$$S = \sum_{i=1}^n W_i * x_i * \prod_{j=1}^k c_j \quad (3-11)$$

Donde:

- S: Idoneidad (Valor final del criterio).
- W_i : peso normalizado del criterio.
- n: Número de criterios.
- X_i : Valor a ser normalizado.
- c_j : Valor del criterio de exclusión.
- k: Número de criterios de exclusión.

Teniendo en cuenta que entre mas cercano sea el valor de respuesta de la ecuación anterior a 1 es mas importante.

4. Análisis de resultados.

En este capítulo se encuentra plasmado el análisis de cada uno de los pasos que se realizaron en el proyecto con cada uno de sus resultados; de esta manera revisar si los escenarios planteados del emplazamiento de microgeneración de energía eólica en Colombia arrojan resultados que concuerden con la información investigada ó poder entender el porque los resultados son diferentes.

Teniendo en cuenta que no solo se revisa el potencial del recurso, sino el resto de factores a evaluar, con su respectivo peso. Además las tablas de resultados cuentan con su formato característico de color azul claro.

4.1. Resultado de encuestas realizadas.

El muestreo hecho en la población ECCI fue de 25 personas,[40] las cuales son sugeridas por la misma metodología, ya que la sugerencia es que por cada plano utilizado su muestra debe ser de 5; sin embargo, para mostrar la información de una manera más resumida solo se va a mostrar una de todas las respuestas obtenidas a modo de ejemplo en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1.: Ejemplo de respuesta de población encuestada.

	ENERGIA EOLICA	ZNI	DESARROLLO MUNICIPAL	COBERTURA ENERGETICA	PNN
ENERGIA EOLICA	1	9	7	3	3
ZNI	9	1	3	7	3
DESARROLLO MUNICIPAL	0,142857143	0,333333333	1	9	1
COBERTURA ENERGETICA	0,333333333	0,142857143	0,111111111	1	1
PNN	0,333333333	0,333333333	1	1	1

En el ejemplo de respuesta de encuesta hecho en la universidad ECCI se puede evidenciar que la persona dio valores en la parte superior de la diagonal de unos, teniendo en cuenta la tabla de pesos relativos de evaluación 3-10; por otro lado la parte inferior de dicha diagonal es el inverso multiplicativo de cada uno de los valores brindados por el evaluador de la encuesta.[36]

Teniendo en cuenta que la diagonal de unos significa que se esta evaluando el mismo criterio a la vez y su importancia es directamente proporcional ó igual; por tal razón es 1. Como se puede evidenciar en la Tabla 4-2[39]

Tabla 4-2.: Matriz global de la totalidad de las encuestas realizadas.

	ENERGIA EOLICA	ZNI	DESARROLLO MUNICIPAL	COBERTURA ENERGETICA	PNN
ENERGIA EOLICA	1	0,652911363	1,735856769	1,034472789	1,066494942
ZNI	1,825934413	1	2,061728873	0,957007078	1,044924351
DESARROLLO MUNICIPAL	0,576084397	0,485029828	1	1,475773162	0,944213115
COBERTURA ENERGETICA	0,966675983	1,044924351	0,677610913	1	0,560693765
PNN	0,937650954	0,957007078	1,059082938	1,783504763	1
suma	5,306345746	4,13987262	6,534279494	6,250757791	4,616326173

En la tabla anterior se puede evidenciar que los valores cambian pero se sigue manteniendo la diagonal de unos y adicional a ello se realiza una suma por cada columna.

En la Tabla 4-3 se refleja la aplicación de la metodología de análisis de datos Row Geometric Mean Method (RGMM); la cual consiste en hacer una multiplicatoria de cada uno de los términos de la encuesta que luego es dividida en la cantidad de muestras y de esta manera nos arroja estos resultados.[42]

Tabla 4-3.: Matriz global normalizada.

	ENERGIA EOLICA	ZNI	DESARROLLO MUNICIPAL	COBERTURA ENERGETICA	PNN
ENERGIA EOLICA	0,188453608	0,157712911	0,26565389	0,16549558	0,231026774
ZNI	0,344103928	0,241553326	0,315525051	0,153102569	0,226354099
DESARROLLO MUNICIPAL	0,108565183	0,117160568	0,153039061	0,23609508	0,204537782
COBERTURA ENERGETICA	0,182173576	0,252404952	0,103700938	0,159980603	0,121458871
PNN	0,176703705	0,231168243	0,162081059	0,285326167	0,216622475
suma	1	1	1	1	1

En la tabla anterior se evidencia el proceso de normalización de cada uno de los términos de los resultados arrojados en las encuestas. Donde se realiza la operación con cada factor y consiste en dividir el valor de cada factor por la sumatoria del resto de factores. De esta manera arroja la sumatoria de cada columna 1.[39] Teniendo en cuenta que cada factor tiene un peso por debajo de 1 y la sumatoria de la totalidad de los pesos da como resultado el valor anteriormente expresado.

Tabla 4-4.: Calculo del vector EIGEN

Plano de Información (PI)	Peso Relativo (W)
ENERGIA EOLICA	0,201668553
ZNI	0,256127795
DESARROLLO MUNICIPAL	0,163879535
COBERTURA ENERGETICA	0,163943788
PNN	0,21438033
suma	1

En la Tabla 4-4 se evidencia el calculo del vector EIGEN, donde se esta calculando el peso de cada uno de los factores analizados y se realiza con el valor de la sumatoria por filas de la tabla de normalización y se divide en 5 que son el numero de factores analizados y de allí sale el peso de cada uno de ellos.[36]

Tabla 4-5.: Cálculo de Valor Principal del Vector EIGEN (λ_{max}).

λ_{max}	Valores
5,215716633	1,070123067
	1,060336444
	1,070834684
	1,024772911
	0,989649527
5,215716633	

En la Tabla 4-5 se realiza el cálculo de lambda, que se realiza tomando el valor de cada vector EIGEN y se multiplica por la sumatoria de la columna de la metodología (RGMM). La cual se hace por cada uno de los factores evaluados y la sumatoria de los resultados obtenidos da un valor de lambda.[39]

Después de hacer el cálculo del vector Eigen se procede a calcular el cálculo del índice de consistencia, para ello se aplica la Ecuación (3-9) que da como resultado **CI = 0,05392916** y el porcentaje de aceptación de la Ecuación (3-10) y da como resultado **CR = 0,04815103**; los cuales son importantes para corroborar si la herramienta hecha posee calidad en la información.

Para hallar el índice de consistencia se toma el valor de Valor principal del Vector EIGEN (λ_{max}), se resta el valor de los factores evaluados que para el caso es igual a 5 y el resultado se divide en la cantidad de factores menos 1;

Para hallar el porcentaje de aceptación del muestreo ó la tasa de consistencia se debe colocar el valor del índice de consistencia hallado y se divide sobre el numero de la tasa de consistencia que se busca en la respectiva tabla según la cantidad de factores evaluados y se general la respectiva operación.[36]

Por último el calculo de idoneidad; para ello se emplea la Ecuación (3-11) y su función es hacer la sumatoria por cada factor; para ello se toma el valor normalizado del factor evaluado, el cual se encuentra en la Tabla 4-7 y se multiplica por el peso relativo del factor que se tiene en la Tabla 3-7 y el resultado final es la suma de los valores obtenidos de cada factor.

Utilizando como ejemplo el municipio de Condoto obtenemos la ecuación (4-1):

Tabla 4-6.: Datos normalizados e idoneidad de Condoto

MUNICIPIO	DESARROLLO DPTAL	ZNI	COBERTURA ENERGETICA	PNN	VELOCIDAD VIENTO	S
CONDOTO	0,67	1	0,3409	1	1	0,837864403

$$S=(0,67)*(0,163)+(1)*(0,256)+(0,3409)*(0,163)+(1)*(0,214)+(1)*(0,201) \quad (4-1)$$

Teniendo en cuenta que este calculo varia dependiendo de los pesos relativos que se le de a cada factor en cada escenario.

4.2. Tablas y mapas de resultados aplicación WLC.

En este punto se va a mostrar los resultados obtenidos en forma de tablas y en mapas del emplazamiento para cada uno de los escenarios planteados; por tal razón la importancia de de cada una de ellas en la posible implementación de un proyecto de generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de la energía eólica.[39] [7]

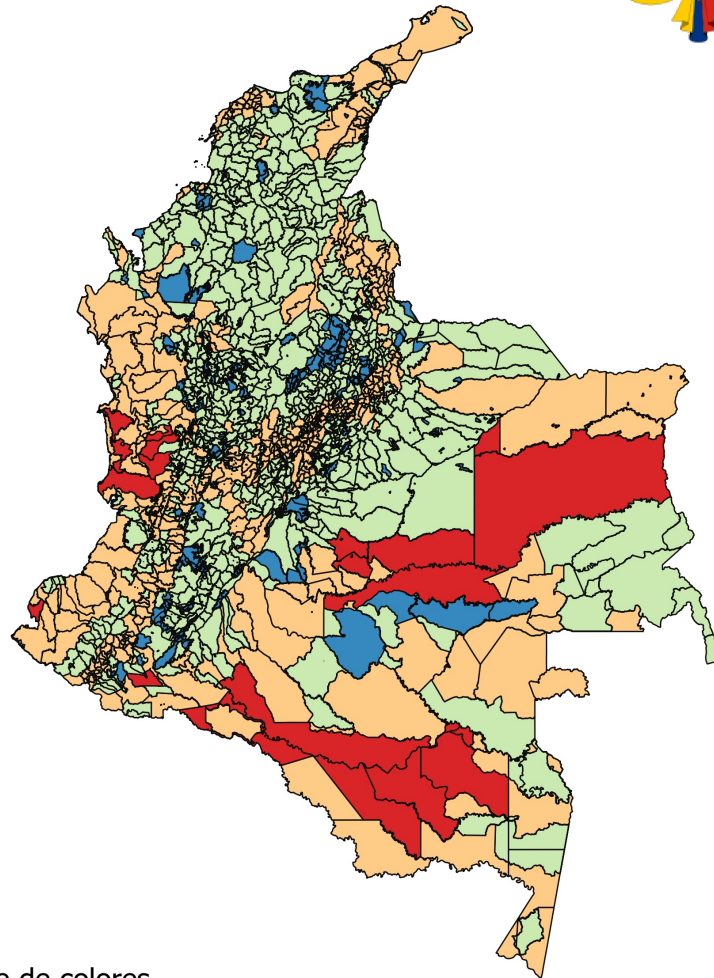
4.2.1. Tabla, mapa y análisis de resultados WLC escenario de encuestas.

Tabla 4-7.: Resultados de los municipios idóneos para el escenario de encuestas.

NV3_COD_IN	NV3_AREA	NV3_NBRE	NIVEL3_DAS	NIVEL3_ZNI	NIVEL3_ENE	NIVEL3_PNN	NIVEL3_VEL	S
1700270205	73740000	CONDOTO	0.67000	1	0.34090	1	100000	0.83786
1700270250	411093000	EL LITORAL DEL SAN JUAN	0.79000	1	0.04100	1	100000	0.80836
1700270491	150915000	NOVITA	0.77000	1	0.02230	1	100000	0.80202
1700270745	176711000	SIPI	0.79000	1	0.00000	1	100000	0.80164
1700270077	378784000	BAJO BAUDO	0.67000	1	0.11960	1	100000	0.80158
1700520520	66826000	FRANCISCO PIZARRO	0.72000	1	0.00830	1	100000	0.79153
1700500325	1207668000	MAPIRIPAN	0.76000	1	0.80440	1	0.30000	0.78743
1700500577	259943000	PUERTO LLERAS	0.76000	1	0.80440	1	0.30000	0.78743
1700500590	346371000	PUERTO RICO	0.76000	1	0.80440	1	0.30000	0.78743
1700950001	1657327000	SAN JOSE DEL GUAVIARE	0.76000	1	0.80440	1	0.30000	0.78743
1700990773	6599884000	CUMARIBO	0.76000	1	0.80440	1	0.30000	0.78743
1700860885	128824000	VILLAGARZON	0.72000	1	0.68590	1	0.30000	0.76145
1700180756	4304557000	SOLANO	0.73000	1	0.87670	1	0.13333	0.76076
1700860573	1085767000	PUERTO LEGUIZAMO	0.73000	1	0.87670	1	0.13333	0.76076
1700910405	1274791000	LA CHORRERA	0.73000	1	0.87450	1	0.13333	0.76040
1700990624	201084000	SANTA ROSALIA	0.76000	1	0.60030	1	0.30000	0.75397
1700910430	150800000	LA VICTORIA	0.73000	1	0.82850	1	0.13333	0.75286
1700910460	1714657000	MIRITI-PARANA	0.73000	1	0.82850	1	0.13333	0.75286
1700910669	1508151000	PUERTO SANTANDER	0.73000	1	0.82850	1	0.13333	0.75286

Después de hacer la revisión de la Tabla 4-7 arrojada como respuesta del escenario de encuestas se puede evidenciar que hay 19 municipios con alto porcentaje de idoneidad para la ejecución de proyectos de esta índole. De los cuales oscilan entre el 75 % y 83 %.

Adicionalmente se puede observar que la gran mayoría de sus resultados apuntan a aplicación de proyectos en el Chocó con un (26 %), Meta con un (15,78 %), Vichada con un (10,52 %), Putumayo con un (10,52 %), Amazonas con un (10,52 %), Nariño con un (5,26 %), Guaviare con un (5,26 %), Caquetá con un (5,26 %), Caldas con un (5,26 %) y Norte de Santander con un (5,26 %). De los cuales se tiene una buena cantidad de recurso energético y con alta viabilidad económica para la apropiación de proyectos de este estilo.[39][7]



Porcentaje de colores.

Resultado de idoneidad escenario de encuestas.

- 0 - 24 %
- 25 - 49 %
- 50 - 74 %
- 75 - 100 %

100 0 100 200 300 400 km



Figura 4-1.: Mapa de resultados escenario de encuestas.

4.2.2. Tabla, mapa y análisis de resultados WLC escenario de desarrollo sustentable.

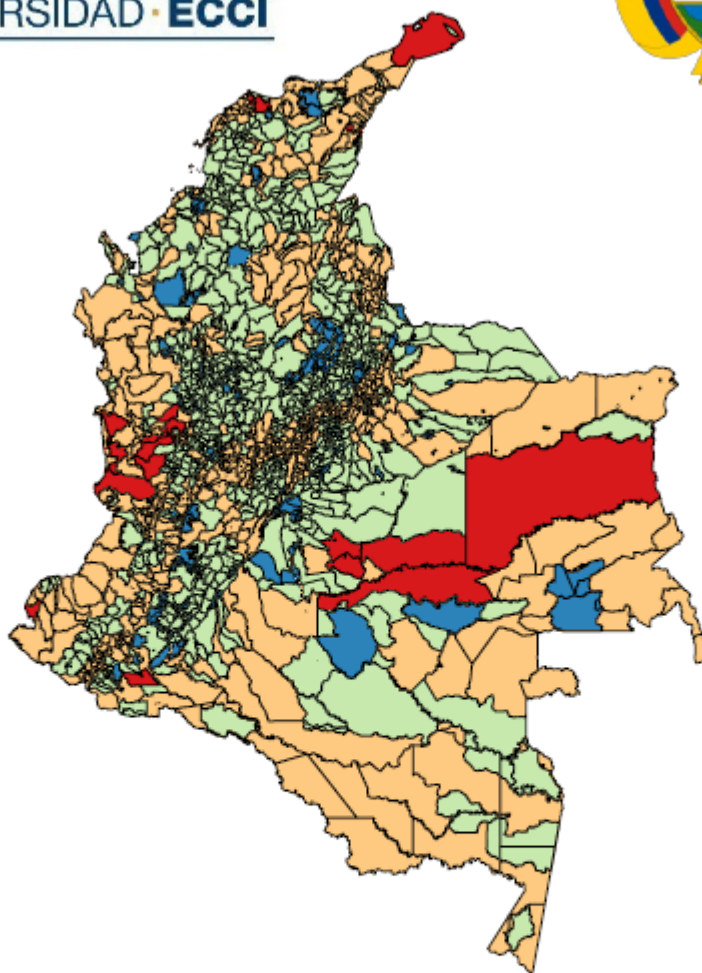
Tabla 4-8.: Resultados más idóneos del escenario de desarrollo sustentable.

NV3_COD_IN	NV3_AREA	NV3_NBRE	NIVEL3_DAS	NIVEL3_ZNI	NIVEL3_ENE	NIVEL3_PNN	NIVEL3_VEL	S
1700270205	73740000	CONDOTO	0.67000	1	0.34090	1	100000	0.89023
1700270077	378784000	BAJO BAUDO	0.67000	1	0.11960	1	100000	0.86080
1700270250	411093000	EL LITORAL DEL SAN JUAN	0.79000	1	0.04100	1	100000	0.85838
1700270491	150915000	NOVITA	0.77000	1	0.02230	1	100000	0.85456
1700270745	176711000	SIPI	0.79000	1	0.00000	1	100000	0.85293
1700520520	66826000	FRANCISCO PIZARRO	0.72000	1	0.00830	1	100000	0.84934
1700470745	98793000	SITIONUEVO	0.79000	0	0.99430	1	100000	0.78517
1700440847	801942000	URIBIA	0.78000	0	0.91150	1	100000	0.77349
1700080001	16333000	BARRANQUILLA	0.79000	0	0.90150	1	100000	0.77283
1700080758	6203000	SOLEDAD	0.79000	0	0.90150	1	100000	0.77283
1700500325	1207668000	MAPIRIPAN	0.76000	1	0.80440	1	0.30000	0.77101
1700500577	259943000	PUERTO LLERAS	0.76000	1	0.80440	1	0.30000	0.77101
1700500590	346371000	PUERTO RICO	0.76000	1	0.80440	1	0.30000	0.77101
1700950001	1657327000	SAN JOSE DEL GUAVIARE	0.76000	1	0.80440	1	0.30000	0.77101
1700990773	6599884000	CUMARIBO	0.76000	1	0.80440	1	0.30000	0.77101
1700200443	13866000	MANAURE	0.78000	0	0.76150	1	100000	0.75354
1700440420	18176000	LA JAGUA DEL PILAR	0.78000	0	0.76150	1	100000	0.75354
1700860885	128824000	VILLAGARZON	0.72000	1	0.68590	1	0.30000	0.75256
1700270073	80232000	BAGADO	0.77000	0	0.75750	1	100000	0.75234
1700660572	93191000	PUEBLO RICO	0.77000	0	0.75750	1	100000	0.75234

Después de hacer la revisión de la Tabla **4-8** arrojada como respuesta del escenario de desarrollo sustentable se puede evidenciar que hay 20 municipios con alto porcentaje de idoneidad para la ejecución de proyectos de esta índole. De los cuales oscilan entre el 75 % y 89 %.

Adicionalmente se puede observar que la gran mayoría de sus resultados apuntan a aplicación de proyectos en el Chocó con un (30 %), Meta con un (15 %), Vichada con un (10 %), Putumayo con un (5 %), Nariño con un (5 %) y Guaviare con un (5 %). De los cuales se tiene una buena cantidad de recurso energético y con alta viabilidad económica para la apropiación de proyectos de este estilo.

Otro factor relevante que se evidencia es la existencia de municipios con ZNI, se encuentran las siguientes: Sitio nuevo, Uribia, Barranquilla, Soledad, Manaure, La jagua del pilar, Bagado y Puerto rico. Haciendo la aclaración que es una parte o sector del municipio el que se encuentra sin conexión de energía eléctrica.[39] [7]



Municipios más idóneos en color rojo.

Resultado de idoneidad escenario de desarrollo sustentable.

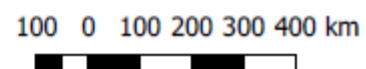
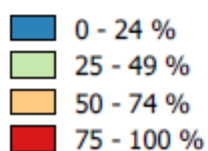


Figura 4-2.: Mapa de municipios mas idóneos escenario de desarrollo sustentable.

4.2.3. Tabla, mapa y análisis de resultados WLC escenario de liberalismo económico.

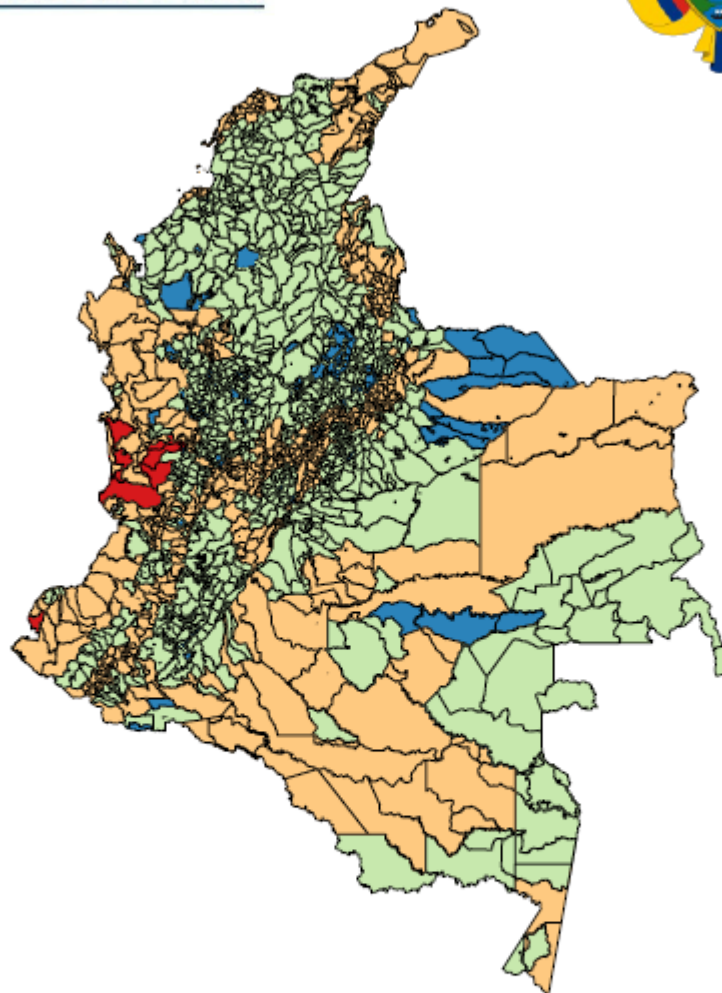
Después de hacer la revisión de la Tabla 4-9 arrojada como respuesta del escenario de liberalismo económico se puede evidenciar que hay 10 municipios con alto porcentaje de idoneidad para la ejecución de proyectos de esta índole. De los cuales oscilan entre el 75 % y 84 %.

Tabla 4-9.: Resultados más idóneos escenario de liberalismo económico.

NV3.COD.IN	NV3.AREA	NV3.NBRE	NIVEL3.DAS	NIVEL3.ZNI	NIVEL3.ENE	NIVEL3.PNN	NIVEL3.VEL	S
1700270205	73740000	CONDOTO	0.67000	1	0.34090	1	100000	0.84634
1700270250	411093000	EL LITORAL DEL SAN JUAN	0.79000	1	0.04100	1	100000	0.83045
1700270745	176711000	SIPI	0.79000	1	0.00000	1	100000	0.82500
1700270491	150915000	NOVITA	0.77000	1	0.02230	1	100000	0.82397
1700270077	378784000	BAJO BAUDO	0.67000	1	0.11960	1	100000	0.81691
1700520520	66826000	FRANCISCO PIZARRO	0.72000	1	0.00830	1	100000	0.81210
1700270205	73740000	CONDOTO	0.67000	1	0.34090	0	100000	0.77934
1700270250	411093000	EL LITORAL DEL SAN JUAN	0.79000	1	0.04100	0	100000	0.76345
1700270250	411093000	EL LITORAL DEL SAN JUAN	0.79000	1	0.04100	0	100000	0.76345
1700270491	150915000	NOVITA	0.77000	1	0.02230	0	100000	0.75697

Adicionalmente se puede observar que la gran mayoría de sus resultados apuntan a aplicación de proyectos en el Chocó con un (90 %) y Nariño con un (10 %). de los cuales se tiene una buena cantidad de recurso energético y con alta viabilidad económica para la apropiación de proyectos de este estilo.

Otro factor relevante que se evidencia es la existencia de municipios con PNN, se encuentran las siguientes: Condoto, El litoral de san juan y Novita. Haciendo la aclaración que es una parte o sector del municipio el que se encuentra con la presencia del parque natural nacional no es todo el territorio.[39] [7]



Municipios más idoneos en color rojo.

Resultado de idoneidad de escenario de neoliberalismo económico.

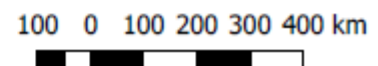
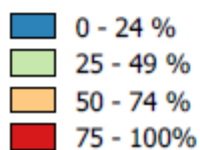


Figura 4-3.: Mapa de municipios mas idóneos escenario de liberalismo económico.

5. Conclusiones y recomendaciones.

5.1. Conclusiones

- En la revisión del estado del arte de los aerogeneradores se evidencian ventajas y de desventajas que se deben tener en cuenta en el momento de una implementación; de igual manera ocurre con los diferentes fondos o entidades a las cuales se puede acudir para buscar financiación para un proyecto de este tipo.
- Los mapas obtenidos de los escenarios propuestos no dependen solo del recurso, si no de factores como zonas no interconectadas, desarrollo municipal, existencia de parques naturales y cobertura energética del municipio. Por tal razón existen lugares con buena velocidad de viento pero no son de los municipios óptimos para implementación dentro de los resultados del emplazamiento; como el caso de Barranquilla, Soledad, Buga, Roncesvalles, Ibagué, entre otros.
- La cantidad de municipios encontrados como emplazamiento en el escenario de encuestas hechas a la comunidad ECCI y el de desarrollo sustentable son muy acordes; ya que fueron de 19 y 20 municipios respectivamente; adicionando que no solo tienen una cantidad de emplazamiento parecido, si no que dentro de sus municipios idóneos concuerdan con los siguientes: Condoto, El litoral de san juan, Novita, Sipí, Bajo baudó, Francisco pizarro, Mapiripan, Puerto lleras, Puerto rico, San José del Guaviare, Cumaribo y Villa garzón. Representando el 63 % de coincidencia en los resultados idóneos.
- En el emplazamiento del escenario de liberalismo económico se tiene solo 10 municipios idóneos, de los cuales se ratifican del resultado de los otros escenarios planteados. Teniendo en cuenta que en esta cantidad se encuentran municipios repetidos, de los cuales significa que hay otra parte del territorio colombiano con dicho nombre mas no que se encuentran repetidos. Como es el caso de Condoto, Novita y El litoral de san Juan.
- La idoneidad de los tres escenarios planteados vistos desde los ejes de la sustentabilidad arrojan resultados claros y muy similares, de los cuales ratifican que dichos municipios son los mas idóneos para la implementación de un tipo de proyectos de microgeneracion de energía eólica. De los mas idóneos que se tienen son los siguientes: Condoto, El litoral de san juan, Novita, Sipí, Bajo baudó y Francisco pizarro; los cuales representan el 31 %,

30 % y 60 % de los resultados idóneos en los 3 escenarios respectivamente.

5.2. Recomendaciones

- Aterrizar los resultados de la investigación un poco mas a fondo, pasar de un limite municipal a una investigación por veredas, barrios, localidades o como se tenga dispuesta la demarcación de cada municipio. De esta manera obtener unos resultados mucho mas concretos en el momento de implementar un proyecto de microgeneracion de energía eléctrica por medio del aprovechamiento del recurso eólico.
- Después de tener los resultados más focalizados hacer la caracterizacion de que aerogeneradores que son mas aptos en dicho territorio, teniendo en cuenta situaciones de trabajo in situ.
- Hacer simulación computarizada de como se comporta el campo eólico en dicho punto y poder prever algún error.

A. Anexo: Tutorial del manejo de QGIS para el tratamiento estadístico de información geográfica.

A.1. Resultado de las metodologías adoptadas.

Después de revisar los meta-datos de cada uno de los mapas a evaluar, se seleccionaron los siguientes mapas:

1- Tener los planos de información:

1. 1.1-Velocidad del viento a 50m Periodo 2000-2010.
2. 1.2- Cobertura energética 2012.
3. 1.3- Zonas no interconectadas 2015.
4. 1.4- Parques Nacionales Naturales.
5. 1.5- Índice de desarrollo humano 2015.

NOTA: Adicional a los planos antes nombrados se tiene el mapa de Nivel 3 de Colombia, el cual cuenta con la división política de los municipios del país.

2- Definir el dato a normalizar de los mapas.

Para ello se selecciona la columna a trabajar y poder normalizar la información.

1. **Velocidad del viento.** Para velocidad del viento se hizo una normalización **Creciente**. Utilizando la columna:

- a) **Rango:** Se utiliza esta columna generando una nueva columna con el promedio del rango y con esta nueva columna se normalizó respectivamente con 1 ó 0; donde uno significa que el municipio es apto para la generación de energía aprovechando del recurso eólico y para el cero no es está entre la velocidad mínima requerida.

Adicional a ello hay que tener en cuenta que esta delimitación es generada en la metodología planteada por Saaty;[40] para contar con una potencia mínima de microgeneración que se contemplada maximo por 20 MW.

2. **Cobertura energética.** Para Cobertura energética se hizo una normalización **Decreciente**. Utilizando la columna:
 - a) **Valor:** Se utiliza esta columna generando una nueva columna con su normalización de valores 1 ó 0. Donde 1 significa que hay coberturas energética y cero que no la tiene el territorio en mención.
3. **Zonas no interconectadas.** Para Zonas no interconectadas se hizo una normalización **Decreciente**.
 - a) Se unió a un mapa existente con las ZNI incompleto, dos tablas de excel, que corresponde a las de ZNI con o sin telemetría. Se revisó la proyección del mapa y luego se adicionó los campos que faltaban partiendo de la información de las tablas, concretamente el código de municipio; el criterio es 1 para un municipio considerado ZNI (con o sin telemetría) y 0 para un municipio interconectado al STN.
4. **Parques Nacionales Naturales.** Para Parques Nacionales Naturales se hizo una normalización **Decreciente**.
 - a) Se realizó una unión entre capas, combinado esta capa con la capa de Nivel 3 Colombia; luego se pudo observar que municipios de Colombia si contaban con un parque natural se crea una nueva columna en donde se normaliza que cuando tenga valor 1 es no hay Parque y 0 es si hay parque.
5. **Índice de desarrollo humano.** Para Índice de desarrollo humano se hizo una normalización **creciente**. Utilizando la columna:
 - a) **Valor:** Se utiliza esta columna generando una nueva columna con su normalización de valores 1 ó 0. donde 1 significa que el desarrollo humano ó económico del municipio es bueno y 0 es lo contrario.

3- Identificación de datos en común.

Después de revisar los datos de los mapas se evidencia la importancia de la utilización del mapa del nivel 3 de Colombia, para así poder ligar la información de todos los mapas por medio del campo de código municipal ó (NV3-COD-IN).

4- Creación de los nuevos mapas.

Estando en QGIS y con cada uno de los planos de información cargados, se realiza una unión entre capas vectoriales para obtener un nuevo plano con la información a nivel municipal. Donde se unen todas las columnas de los dos planos anteriores, se utiliza la herramienta "vectorial-herramientas de geo proceso- unión", allí el software necesita una capa de entrada "nivel 3 Colombia" y capa de entrada 2 "aquí se hace de uno en uno los otros planos de información". Como se evidencia en la Fig.A-1

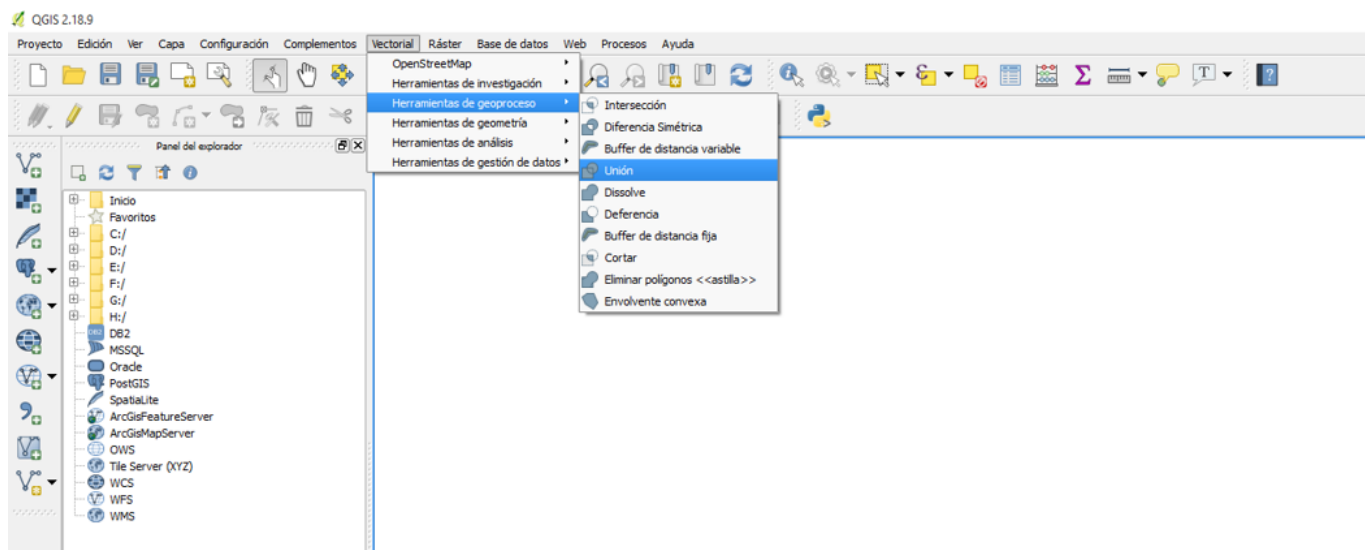


Figura A-1.: Proceso de unión de mapas.

5- Complementar información de los nuevos mapas.

Luego de obtener los nuevos planos de información, se complementan utilizando el plano de información de PNN, ya que al realizar los otros planos de información en las uniones se pierde la información sobre los parques naturales.

Para la unión de tablas se sigue el siguiente paso a paso:

A: Se da click derecho en cada plano para utilizar las propiedades.

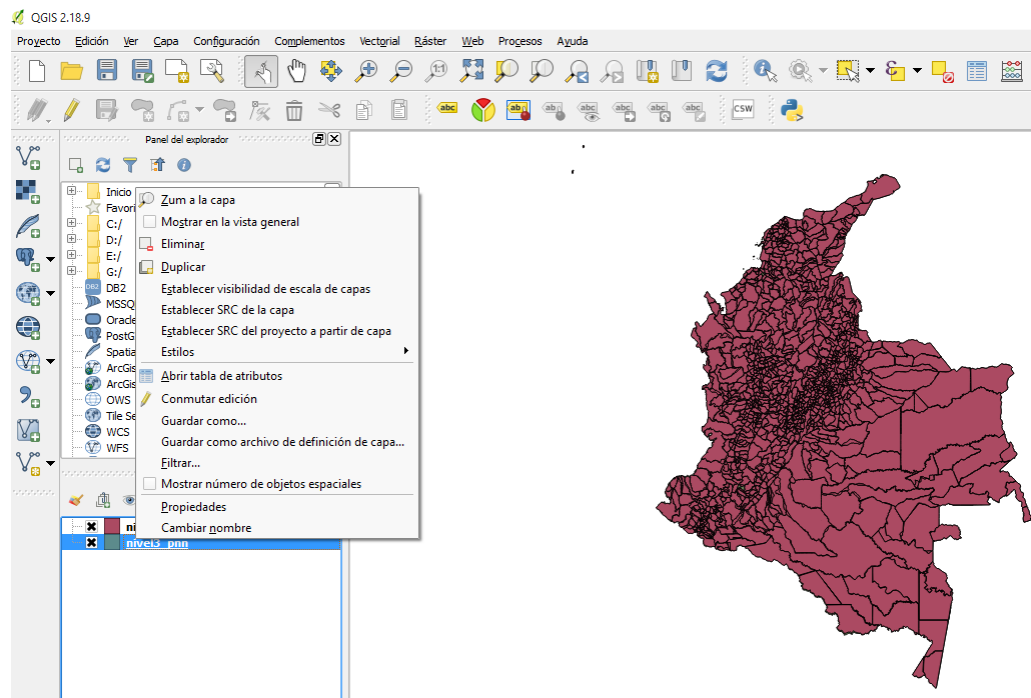


Figura A-2.: Proceso de complemento de información de PNN.

B: Se utiliza la herramienta uniones y se le da en más para pasar a la operación.

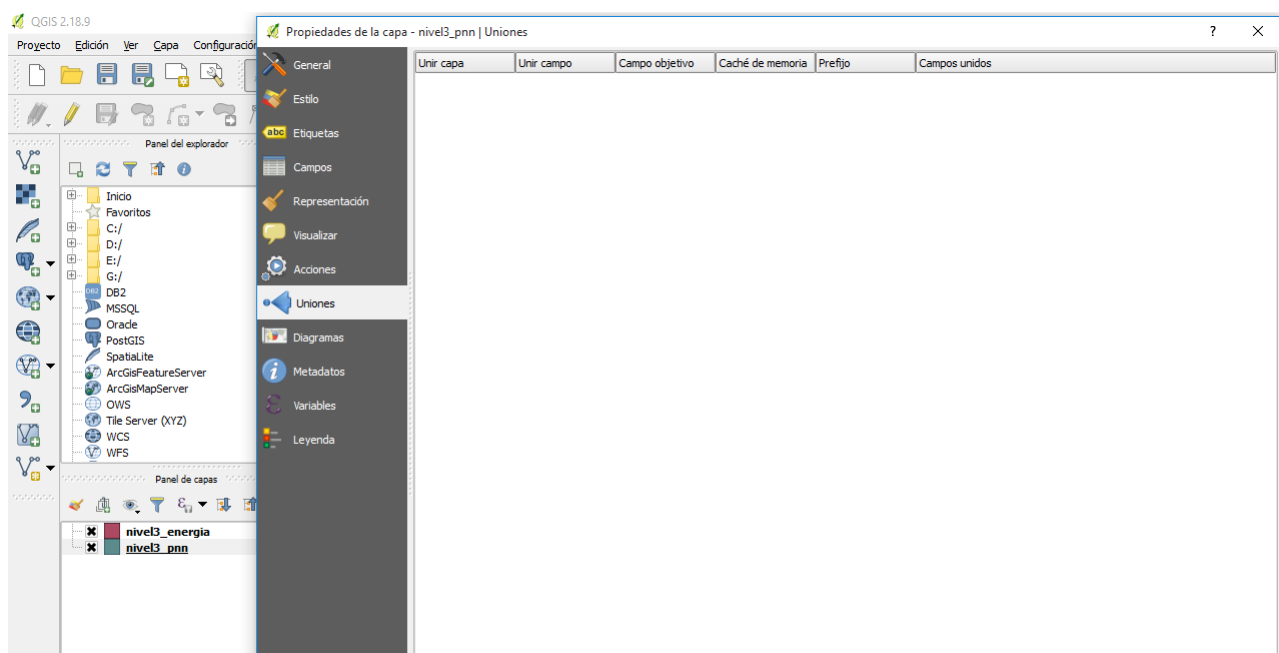


Figura A-3.: Proceso de complemento de información de PNN.

C: El software pide con cual otra capa se va a unir la principal “nivel3-pnn”, por lo tanto, se selecciona en unir capa la de “nive3-energia”.

Luego se selecciona unir campo y en esta selección el objetivo es colocar lo que es igual para cada uno de los dos planos de información; Por esta razón se selecciona la columna “NV3-COD-IN”; por último se elige el campo que se va a unir y se seleccionan las columnas que dan la información de los planos de manera normalizada.

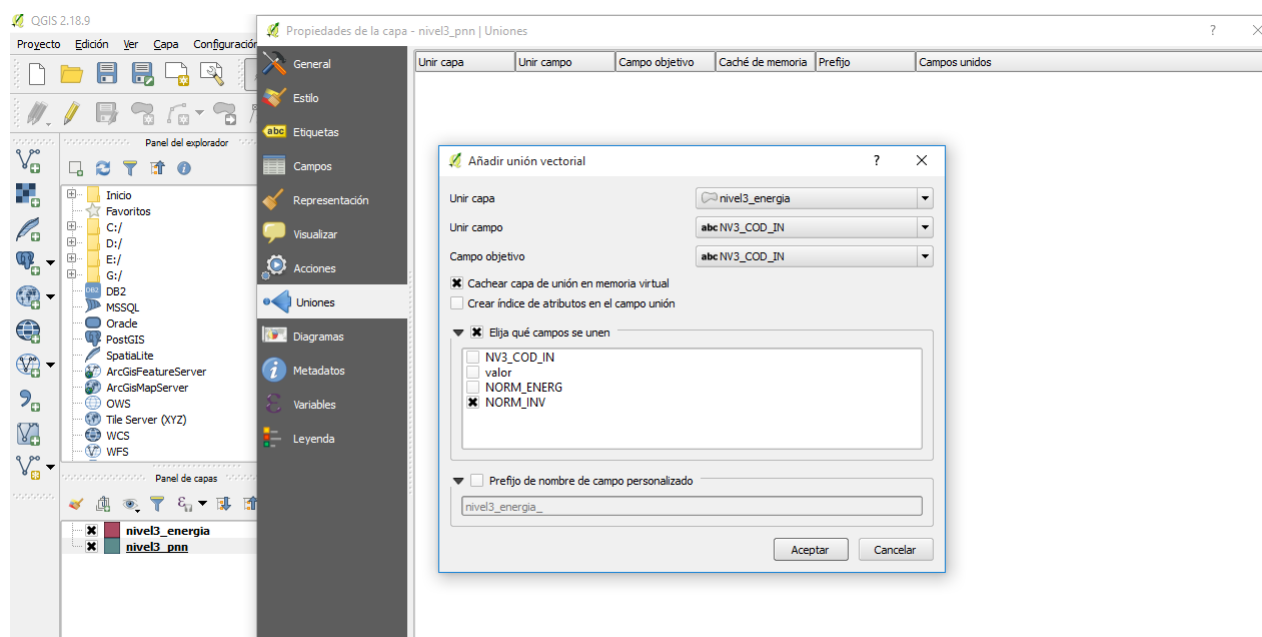


Figura A-4.: Proceso de complemento de información de PNN.

6- Descarga y estadística de excel y aplicación WLC.

con toda la información de los 5 planos de información en 1 solo se procede a dos cosas:

- A: Descargar una tabla de Excel y con ello realizar la parte estadística, esto se realiza en Excel para poder generar tabla independiente y también el QGIS me permite hacer los cálculos en necesidad de exportar datos desde Excel.
- B: Se procede a aplicar el WLC para poder llegar a determinar las partes que cumplen con la necesidad del estudio. Esto se aplica en la tablas de atributos, utilizando la calculadora de campos, se usa la misma fórmula que se realiza en Excel.

7- Obtención de información.

Se obtiene los mapas con la información del objetivo de estudio como se observa en la siguiente imagen:

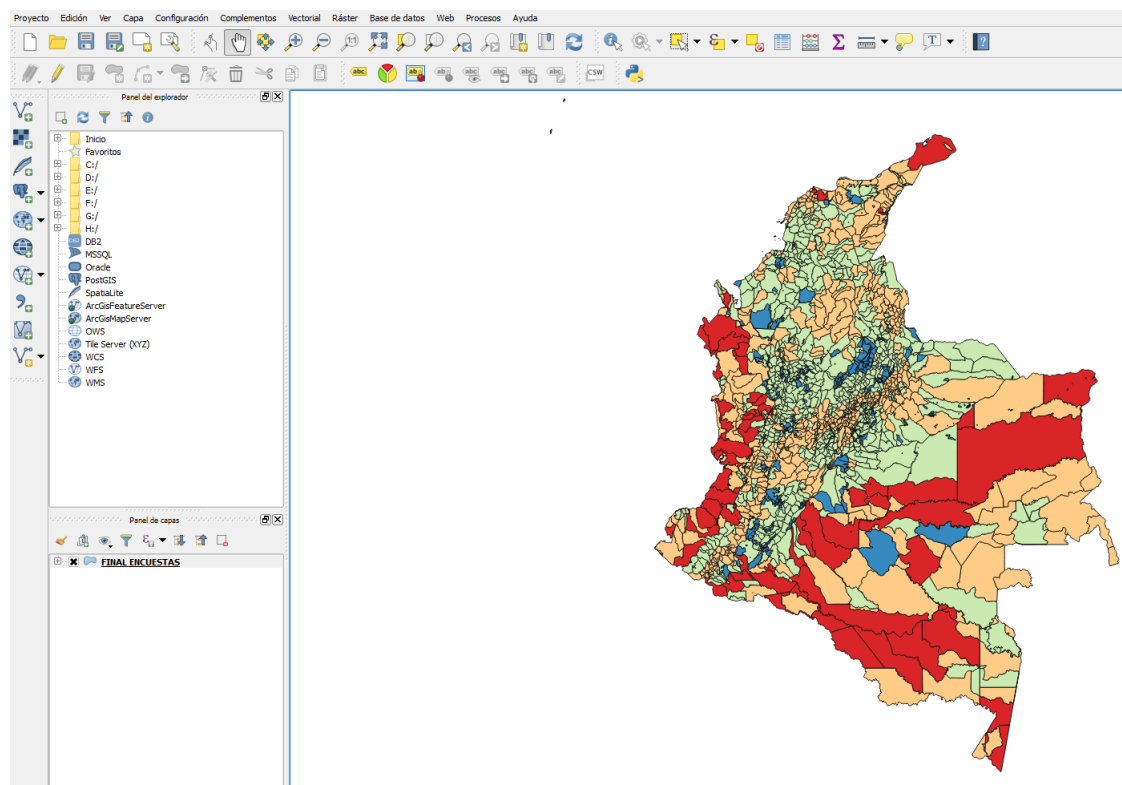


Figura A-5.: Proceso de complemento de información de PNN.

B. Anexo: Aplicación de encuestas.

B.1. Creación del Cuestionario.

En la aplicación de las encuestas se reunieron los participantes para explicar el proyecto, su objetivo y la participación de cada uno de ellos dentro del proceso de investigación.

	UNIVERSIDAD ECCI. MAESTRIA EN INGENIERIA. ENCUESTA EMPLAZAMIENTO DE MICROGENERACION DE ENERGIA EOLICA EN COLOMBIA.
---	---

ESTUDIANTE: _____ CODIGO: _____ PROGRAMA: _____ FECHA: _____

FICHA TECNICA.

Esta encuesta esta diseñada para establecer el nivel de importancia de los criterios utilizados en la investigacion de la microgeneracion de energia electrica en colombia; para ello tenga en cuenta lo siguiente:

- 1- **Recurso eolico:** Es la velocidad generada por el viento para la generacion de energia electrica con el aprovechamiento de su energia.

Zonas no interconectadas (ZNI): zonas de colombia que no cuentan con conexión a la red electrica.

Desarrollo Municipal: Es la capacidad que tiene el municipio para gestionar proyectos de desarrollo.

Cobertura energetica: Hace referencia al porcentaje de personas que tienen conexión de energia electrica respecto a la cantidad de habitantes del municipio.

Parques nacionales naturales: Tiene en cuenta si hay o no parques en el territorio de estudio.

- 2- Utilice la siguiente tabla de valores, teniendo en cuenta los siguientes rangos:

Menos importante				Igual	Mas importante			
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9

- 3- **Metodologia:** Dele valor a la importancia que tiene el factor de la fila vs al factor de la columna teniendo en cuenta los pesos anteriormente expuestos en la tabla.

	ENERGIA EOLICA	ZONA NO INTERCONECTADA	DESARROLLO MUNICIPAL	COBERTURA ENERGETICA	PARQUES NACIONALES NATURALES
ENERGIA EOLICA					
ZONA NO INTERCONECTADA					
DESARROLLO MUNICIPAL					
COBERTURA ENERGETICA					
PARQUES NACIONALES NATURALES					

Nota: Tenga en cuenta que se debe dar valor a la parte superior de la tabla ya que la parte inferior es el valor inverso respectivamente.

Figura B-1.: Encuesta realizada a la muestra de población ECCI.

Después se explicó en que consistía la metodología de la encuesta, de la cual se debía realizar el análisis a cada una de las preguntas expuestas a continuación, las cuales debían ser evaluadas respectivamente fila Vs. columna; de modo tal que estas respuestas iban a ser utilizadas dentro del proceso de análisis estadístico; haciendo referencia que la muestra de encuestados era de 25 personas debido a la metodología adoptada del señor Saaty.[40]

B.2. Formulación de las Preguntas.

las preguntas que se evaluaron durante el proceso de encuestas, fueron:

1. ¿ Qué tan importante es la velocidad del viento V/S las zonas no interconectadas?.
2. ¿ Qué tan importante es la velocidad del viento V/S el desarrollo municipal?.
3. ¿ Qué tan importante es la velocidad del viento V/S la cobertura energética?.
4. ¿ Qué tan importante es la velocidad del viento V/S los parques nacionales naturales?.
5. ¿ Qué tan importante son las zonas no interconectadas V/S la velocidad del viento?.
6. ¿ Qué tan importante son las zonas no interconectadas V/S el desarrollo municipal?.
7. ¿ Qué tan importante son las zonas no interconectadas V/S la cobertura energética?.
8. ¿ Qué tan importante son las zonas no interconectadas V/S los parques nacionales naturales?.
9. ¿ Qué tan importante es el desarrollo municipal V/S la velocidad del viento?.
10. ¿ Qué tan importante es el desarrollo municipal V/S las zonas no interconectadas?.
11. ¿ Qué tan importante es el desarrollo municipal V/S la cobertura energética?.
12. ¿ Qué tan importante es el desarrollo municipal V/S los parques nacionales naturales?.
13. ¿ Qué tan importante es la cobertura energética V/S la velocidad del viento?.
14. ¿ Qué tan importante es la cobertura energética V/S las zonas no interconectadas?.
15. ¿ Qué tan importante es la cobertura energética V/S cobertura energética?.
16. ¿ Qué tan importante es la cobertura energética V/S los parques nacionales naturales?.
17. ¿ Qué tan importante son los parques nacionales naturales V/S la velocidad del viento?.
18. ¿ Qué tan importante son los parques nacionales naturales V/S las zonas no interconectadas?.
19. ¿ Qué tan importante son los parques nacionales naturales V/S desarrollo municipal?.
20. ¿ Qué tan importante son los parques nacionales naturales V/S la cobertura energética?.

B.3. Tabla de valoración de preguntas de la encuesta.

Menos importante				Igual	Más importante			
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Absoluta	Muy grande	Grande	Pequeña	Igual	Pequeña	Grande	Muy grande	Absoluta

Tabla B-1.: Escala de importancia relativa
[40]

B.4. Resultados Tabulares del Análisis de las Respuestas al Proceso de Encuestas.

Encuestado 1

	1	2	3	4	5
1	1	9	7	1/3	1/3
2	1/9	1	3	1/7	1/9
3	1/7	1/3	1	9	1/7
4	3	7	1/9	1	1/7
5	3	9	7	7	1

Encuestado 2

	1	2	3	4	5
1	1	1/5	7	1/3	5
2	5	1	5	1/7	1/7
3	1/7	1/5	1	9	9
4	3	7	1/9	1	9
5	1/5	7	1/9	1/9	1

Encuestado 3

	1	2	3	4	5
1	1	1/7	7	1/5	1/3
2	7	1	9	9	1
3	1/7	1/9	1	9	9
4	5	1/9	1/9	1	3
5	3	1	1/9	1/3	1

Encuestado 4

	1	2	3	4	5
1	1	7	9	7	1/9
2	1/7	1	7	1/5	9
3	1/9	1/7	1	9	5
4	1/7	5	1/9	1	1/5
5	9	1/9	1/5	5	1

Encuestado 5

	1	2	3	4	5
1	1	9	7	7	1/9
2	1/9	1	3	5	1/9
3	1/7	1/3	1	1/9	1
4	1/7	1/5	9	1	9
5	1/7	1/5	1/9	1/5	1

Encuestado 6

	1	2	3	4	5
1	1/5	7	1	1	
2	5	1	5	7	1/3
3	1/7	1/5	1	5	1/3
4	1	1/7	1/5	1	1/3
5	9	9	1/5	1/9	1

Encuestado 7

	1	2	3	4	5
1	1	5	1/7	1/7	3
2	1/5	1	1/5	5	5
3	7	5	1	5	1

Encuestado 8

	1	2	3	4	5
1	1	1/9	9	7	5
2	9	1	7	9	5
3	1/9	1/7	1	9	1/7

Encuestado 9

	1	2	3	4	5
1	1	9	3	1/3	1/9
2	1/9	1	1/3	9	1/9
3	1/3	3	1	9	7

4	7	1/5	1/5	1	1/3
5	1/3	1/5	1	3	1

4	1/7	1/9	1/9	1	1
5	1/5	1/5	7	1	1

4	3	1/9	1/9	1	1
5	9	9	1/7	1	1

Encuestado 10

	1	2	3	4	5
1	1	5	1/3	3	1/9
2	1/5	1	3	7	5
3	3	1/3	1	3	3
4	1/3	1/7	1/3	1	1/7
5	9	1/5	1/3	7	1

Encuestado 11

	1	2	3	4	5
1	1	1/5	3	1/9	9
2	5	1	9	1/5	1/5
3	1/3	1/9	1	1/9	1
4	9	5	9	1	5
5	1/9	5	1	1/5	1

Encuestado 12

	1	2	3	4	5
1	1	3	1/5	7	1/9
2	1/3	1	1/7	9	1/9
3	5	7	1	9	1/9
4	1/7	1/9	1/9	1	1
5	9	9	9	1	1

Encuestado 13

	1	2	3	4	5
1	1	9	1/7	7	7
2	1/9	1	9	9	9
3	7	1/9	1	9	7
4	1/7	1/9	1/9	1	1
5	1/7	1/9	1/7	1	1

Encuestado 14

	1	2	3	4	5
1	1	1/5	7	3	1/9
2	5	1	1/9	9	1/3
3	1/7	9	1	9	1/9
4	1/3	1/9	1/9	1	1/3
5	9	3	9	3	1

Encuestado 15

	1	2	3	4	5
1	1	7	5	5	9
2	1/7	1	7	7	3
3	1/5	1/7	1	5	3
4	1/5	1/7	1/5	1	3
5	1/9	1/3	1/3	1/3	1

Encuestado 16

	1	2	3	4	5
1	1	7	3	9	7
2	1/7	1	1/7	5	5
3	1/3	7	1	7	5
4	1/9	1/5	1/7	1	3
5	1/7	1/5	1/5	1/3	1

Encuestado 17

	1	2	3	4	5
1	1	1/9	1/5	9	1/7
2	9	1	9	7	1/7
3	5	1/9	1	9	1/5
4	1/9	1/7	1/9	1	1/9
5	7	7	5	9	1

Encuestado 18

	1	2	3	4	5
1	1	1/5	9	9	1/7
2	5	1	1/7	7	1/7
3	1/9	7	1	9	1/5
4	1/9	1/7	1/9	1	1/9
5	7	7	5	9	1

Encuestado 19

	1	2	3	4	5
1	1	1/5	9	1/3	5
2	5	1	9	5	7
3	1/9	1/9	1	9	5

Encuestado 20

	1	2	3	4	5
1	1	7	1/5	1/7	1/9
2	1/7	1	1/7	5	1/7
3	5	7	1	9	1/9

Encuestado 21

	1	2	3	4	5
1	1	7	9	3	9
2	1/7	1	1/9	5	5
3	1/9	9	1	9	3

4	3	1/5	1/9	1	9
5	1/5	1/7	1/5	1/9	1

4	7	1/5	1/9	1	1/9
5	9	7	9	9	1

4	1/3	1/5	1/9	1	3
5	1/9	1/5	1/3	1/3	1

Encuestado 22

	1	2	3	4	5
1	1	1/9	9	9	1/7
2	9	1	1/3	7	7
3	1/9	3	1	9	1/5
4	1/9	1/7	1/9	1	1/9
5	7	1/7	5	9	1

Encuestado 23

	1	2	3	4	5
1	1	1/3	1/7	1/3	9
2	3	1	1/7	1/7	1/9
3	7	7	1	9	9
4	3	7	1/9	1	1/9
5	1/9	9	1/9	9	1

Encuestado 24

	1	2	3	4	5
1	1	1/5	1/9	3	9
2	5	1	1/7	1/5	7
3	9	7	1	1/9	9
4	1/3	5	9	1	1/9
5	1/9	1/7	1/9	9	1

Encuestado 25

	1	2	3	4	5
1	1	5	1/5	7	9
2	1/5	1	1/7	1/5	7
3	5	7	1	1/9	9
4	1/7	5	9	1	1/9
5	1/9	1/7	1/9	9	1

Tabla B-2.: Encuestas realizada a población de la ECCL.

Bibliografía

- [1] A. Girón, “Objetivos del desarrollo sostenible y la agenda 2030: Frente a las políticas públicas y los cambios de gobierno en América latina,” *Problemas del Desarrollo*, vol. 47, no. 186, pp. 3 – 8, 2016.
- [2] J. Soto, “Desarrollo de la energía eólica en Colombia,” thesis, UNIVERSIDAD DE AMÉRICA., 2016.
- [3] Pinilla, “El poder del viento,” *Revista de Ingeniería*, pp. 64–69, 11 2008.
- [4] F. de energía., “Energías alternativas..” url<https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/que-son-energias-alternativas/>.
- [5] N. CEPAL *et al.*, *Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe: guía para la formulación de políticas energéticas*. Cepal, 2003.
- [6] IDEAM, “Atlas de viento y energía eólica de Colombia,” tech. rep., IDEAM.
- [7] I. UPME *et al.*, *Atlas de velocidad de viento en Colombia*. 2019.
- [8] y. h. . u. p. Página Web, title=Distribución Gamma.
- [9] P. Web, “Distribución lognormal.” url<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/probability-distributions-and-random-data/supporting-topics/distributions/lognormal-distribution/>, 2019.
- [10] P. Web, “Rosa de viento..” url<https://content.meteoblue.com/es/dimensiones-temporales/history/rosa-de-los-vientos>, 2019.
- [11] M. CASTRO-GARCÍA, J. I. ROJAS-SOLA, and M. D. P. CARRANZA-CAÑADAS, “CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA DE LOS MOLINOS DE VIENTO MEDITERRÁNEOS ESPAÑOLES,” *DYNA*, vol. 80, pp. 22 – 30, 02 2013.
- [12] R. B. ELBER, “Estudio técnico de operación para generador eólico de 1,5 kw modular, como fuente de energía para equipo de obtención de agua por condensación del aire,” Master’s thesis.
- [13] E. Guauque and G. Torres, “Análisis aerodinámico de una microturbina eólica de eje vertical para la generación de energía eléctrica en una zona urbana de Bogotá, Colombia,” Master’s thesis, UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA, 2014.
- [14] E. Kumara, N. Hettiarachchi, and R. Jayathilake, “Review paper: Overview of the

vertical axis wind turbines,” *International Journal of Scientific Research and Innovative Technology*, vol. 4, pp. 2313–3759, 08 2017.

- [15] F. Luna and M. Ramos, “Diseño de un aerogenerador para suministro de energía eléctrica para el alumbrado nocturno-externo de la planta vidrio andino s.a.,” Master’s thesis, FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, 2017.
- [16] J. Solís-Chaves, C. Rocha-Osorio, A. Murari, V. M. Lira, and A. J. Sguarezi Filho, “Extracting potable water from humid air plus electric wind generation: A possible application for a brazilian prototype,” *Renewable Energy*, vol. 121, pp. 102 – 115, 2018.
- [17] C. Gonzalez, “Análisis técnico de los diferentes tipos de baterías comercialmente disponibles para su integración en el proyecto de una microrred aislada,” Master’s thesis, UNIVERSIDAD FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, 2015.
- [18] M. de minas, “Fazni..” [urlhttps://www.minenergia.gov.co/fazni](https://www.minenergia.gov.co/fazni).
- [19] S. G. D. REGALIAS, “Sgr..” [urlhttps://www.sgr.gov.co/](https://www.sgr.gov.co/).
- [20] F. de apoyo financiero para la energización de las zonas rurales interconectadas, “Faer..” [urlhttps://www.minenergia.gov.co/faer](https://www.minenergia.gov.co/faer).
- [21] FINDETER, “Findeter..” [urlhttps://www.findeter.gov.co/publicaciones/500002/ques-findeter/](https://www.findeter.gov.co/publicaciones/500002/ques-findeter/).
- [22] BANCOLEX, “Bancoldex.” [urlhttps://www.bancoldex.com/sobre-bancoldex/quienes-somos](https://www.bancoldex.com/sobre-bancoldex/quienes-somos).
- [23] COLCIENCIAS, “Colciencias.” [urlhttps://www.colciencias.gov.co/quienes_somos/sobre-colciencias](https://www.colciencias.gov.co/quienes_somos/sobre-colciencias).
- [24] B. I. D. DESARROLLO, “Banco interamericano de desarrollo.” [urlhttps://www.iadb.org/es/acerca-del-bid/financiamiento-del-bid/financiamiento-del-bid%2C6028.html](https://www.iadb.org/es/acerca-del-bid/financiamiento-del-bid/financiamiento-del-bid%2C6028.html).
- [25] BM, “Bm.” [urlhttps://www.bancomundial.org/](https://www.bancomundial.org/).
- [26] CAF, “Caf.” [urlhttps://www.caf.com/es/sobre-caf/quienes-somos/](https://www.caf.com/es/sobre-caf/quienes-somos/).
- [27] FENOGE, “Fondo de energías no convencionales y gestión eficiente de la energía.” [urlhttps://fenoge.com/](https://fenoge.com/).
- [28] PRONE, “Programa de normalización de redes eléctricas.” [urlhttps://www.minenergia.gov.co/prone1](https://www.minenergia.gov.co/prone1).
- [29] FOES, “Fondo de energía social.” [urlhttps://www.minenergia.gov.co/1520](https://www.minenergia.gov.co/1520).
- [30] FSSRI, “Fondo de solidaridad para subsidios y retribución de ingreso..” [urlhttps://www.minenergia.gov.co/fssri1](https://www.minenergia.gov.co/fssri1).
- [31] FNR, “Fondo nacional de regalías..” [urlhttp://www.fnr.gub.uy/](http://www.fnr.gub.uy/).

- [32] E. Pappas, “Un nuevo enfoque sistémico de la sostenibilidad: la responsabilidad de la universidad de enseñar la sostenibilidad en contextos,” *Revista de educación en sostenibilidad*, vol. 3, p. 29, 03 2012.
- [33] V. S. K. Yannis A. Phillis and V. Manousiouthakis, “Una revisión de los modelos de evaluación de la sostenibilidad,” *REVISTA DE SISTEMAS DE IEEE*, vol. 4, p. 11, 03 2010.
- [34] T. J. E. Annette Evans, Vladimir Strezov *, “Evaluación de indicadores de sostenibilidad para tecnologías de energía renovable,” *Revision de energias renovables y sostenibles*, vol. 1, p. 07, 03 2009.
- [35] C. de Colombia, “Ley 1715 de 2014..” Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, 2014.
- [36] K. L. Zambon, A. A. d. F. M. Carneiro, and A. Silva, “Análise de deciscao multicritério na localizacao de usinas termoelectricas utilizando SIG,” *Pesquisa Operacional*.
- [37] DANE, “Metadatos dane..” url<https://geoportal.dane.gov.co/>.
- [38] PNN, “Parques nacionales naturales.” url<https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/mapa-de-parques-nacionales-naturales-de-colombia/>.
- [39] C. de Lima, “Análise multicritério e aplicação SIG para localização do potencial eólico, visando o desenvolvimento sustentável,” B.S. thesis, Universidade Federal do ABC, 2017.
- [40] T. L. Saaty and K. P. Kearns, *Analytical planning: The organization of system*, vol. 7. Elsevier, 2014.
- [41] K. Teknomo, “Analytic hierarchy process (ahp) tutorial,” *Revoledu. com*, pp. 1–22, 2006.
- [42] G. S. C. de Lima, P. Leite, B. C. Canesso, and K. L. Zambon, “Ubicación de la generación distribuida desde la perspectiva del desarrollo sostenible,” in *5ª Conferencia Internacional de Jóvenes sobre Energía (IYCE) de 2015*.
- [43] S. Zambrano-Asanza, W. E. Chumbi, J. F. Franco, and A. Padilha-Feltrin, “Análise de decisão multicritério em sistemas de informações geográficas para identificação de locais ideais de novas subestações,” *VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos SBSE2020*, p. 6, 2020.
- [44] P. Juan, *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*.